



**Daniel José Quinta Santos Nunes**

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Contador Inteligente – Casa Inteligente**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientador: Pedro Pereira, Professor Auxiliar, FCT - UNL

Júri

Presidente: Prof. Doutor, Rui Manuel Leitão Santos Tavares, FCT - UNL  
Arguente: Prof. Doutor, João Francisco Alves Martins, FCT - UNL  
Vogal: Prof. Doutor, Pedro Miguel Ribeiro Pereira, FCT - UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2016**



## **Contador Inteligente – Casa Inteligente**

Copyright © Daniel José Quinta Santos Nunes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Pedro Pereira, por me ter dado a oportunidade de desenvolver este tema de dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e, a todo o seu corpo docente por todo o conhecimento de excelência que me transmitiram ao longo do Mestrado integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. A todos os colegas que tive o privilégio de conhecer e criar uma forte amizade, em especial ao José Simão, José Franco e Ricardo Mexia, no qual agradeço toda a ajuda e paciência que tiveram para me aturar.

Ao meu pai, pelo seu constante desafio às minhas capacidades culminando na progressão dos meus estudos, por ter acreditado em mim e pelo seu apoio incondicional. À minha mãe, que nunca duvidou das minhas capacidades, que sempre me apoiou e me motivou em qualquer altura da minha vida, não só como mãe mas também como amiga. Agradeço aos dois, pelos princípios que me transmitiram, pela experiência que me proporcionaram. À minha irmã, que sempre me apoiou ao longo desta dissertação bem como da minha vida.

A todos os que me apoiaram e contribuíram para a conclusão deste projeto.

Muito Obrigado!



## RESUMO

---

Os avanços tecnológicos nos setores da eletrónica e dos sistemas de informação permitiram que, a partir da década de 90, muitas empresas de distribuição de energia elétrica, em vários países de todo o mundo, pudessem utilizar o sistema de pré-pagamento neste sector, como uma modalidade alternativa ao faturamento convencional. Em Portugal o sistema de tarifa da energia elétrica é o pós-pago, o qual possui vantagens e desvantagens. Neste trabalho serão analisados os casos já existentes, apresentando os conceitos desse sistema, assim como as principais dificuldades encontradas na implantação desse novo método de taxação de energia elétrica. Apesar de se ter um sistema piloto atualmente implementado em Portugal, o *InovGrid*, o qual está pensado para permitir a modalidade de pré-pagamento, este ainda não está ativo. Serão também abordados os principais problemas referidos pelas respetivas entidades responsáveis, bem como as vantagens e desvantagens para os consumidores. Será ainda abordada a questão da elaboração de um modelo de previsão do consumo de energia em ambiente doméstico, bem como a introdução do conceito da *Internet of Things*, associando a monitorização e o aconselhamento do consumidor, de modo a que este atinja os objetivos a que se propôs com a pré-compra de energia no início de cada mês.

**Palavras-chave:** Energia, Pré-pagamento, IoT, Arduino, modelo, monitorização, previsão, séries temporais, auto-regressivo, Box-Jenkins, rede neural, árvore de decisão.

---



## ABSTRACT

---

Technological advances in the fields of electronics and information systems, in the 90s, enabled many electricity distribution companies in several countries around the world, to use the pre-paid system in this sector as an alternative method to conventional billing. In Portugal, this tariff system for electricity is postpaid, which has advantages and disadvantages. In this work, it will cover existing cases, by presenting the concepts of this system, as well as the main difficulties encountered in implementing this new electricity prepaid method. Although we have a pilot system currently implemented in Portugal, InovGrid, which is designed to allow the form of prepaid system, it isn't working yet. The main problems mentioned by the responsible authorities, will also be addressed, as well as the advantages and disadvantages for consumers. Finally, it will also be mention the question regarding the development of forecasting model of energy consumption in home environment, as well as the introduction of the concept of IoT (Internet of Things), associating monitoring and consumer advice, in order to reach the goals it had set first with the energy pre-purchase at the beginning of each month.

**Keywords:** Electricity, Prepaid, IoT, model, monitoring, predict, time series, autoregressive, Box-Jenkins, neural network, decision tree.

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Problema e Motivação . . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Metodologia de Trabalho . . . . .	3
1.5 Formulação da Questão de Pesquisa . . . . .	4
1.6 Estrutura do Documento . . . . .	5
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1 O Consumo de Energia Elétrica . . . . .	7
2.2 O Pré-Pagamento de Energia Elétrica . . . . .	9
2.2.1 Análise às Opções de Implementação . . . . .	10
2.3 Avaliação do Consumo de Energia Elétrica . . . . .	13
2.4 Métodos de Previsão de Consumo . . . . .	16
<b>3 Arquitetura Proposta e Tecnologias</b>	<b>25</b>
3.1 Requisitos . . . . .	25
3.2 Recomendações na Implementação do Cenário de Pré-Compra de Energia Elétrica . . . . .	26
3.3 Arquitetura Proposta . . . . .	29
3.4 A Previsão de Consumo . . . . .	31
3.5 Seleção do Modelo de Previsão . . . . .	31
3.5.1 Metodologia Box & Jenkins . . . . .	32
3.5.2 Média Móvel Simples . . . . .	38
3.5.3 Suavização Exponencial Simples . . . . .	38
3.5.4 Métodos de Cálculo da Exatidão do Modelo de Previsão . . . . .	39
3.6 Tecnologias de Comunicação . . . . .	40

3.6.1	Protocolos de Comunicação com Fios . . . . .	40
3.6.2	Protocolos de Comunicação sem Fios . . . . .	43
3.7	<i>Hardware</i> Principal . . . . .	46
3.7.1	Arduino . . . . .	46
3.8	<i>Hardware</i> Complementar/Periférico . . . . .	49
3.8.1	ESP8266 . . . . .	49
3.8.2	Sensor de Corrente . . . . .	51
3.8.3	Relé . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Implementação</b>	<b>55</b>
4.1	Aquisição de Dados . . . . .	56
4.2	Modelo de Previsão de Consumo . . . . .	57
4.2.1	Procura do Modelo de Previsão de Consumo . . . . .	57
4.3	Bloco Nó Sensor . . . . .	61
4.3.1	<i>ATmega2560</i> . . . . .	61
4.3.2	Calibração Sensor de Corrente . . . . .	62
4.3.3	Esquemático do <i>Hardware</i> . . . . .	64
4.4	Monitorização de Consumo . . . . .	65
4.5	Ferramentas Utilizadas . . . . .	66
4.5.1	<i>Software</i> Aplicacional . . . . .	68
4.5.2	Interface Gráfica . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>73</b>
5.1	Análise aos Métodos de Previsão de Consumo . . . . .	73
5.2	Monitorização de Consumo . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>79</b>
6.1	Conclusões . . . . .	79
6.1.1	Pré-Compra de Energia . . . . .	80
6.1.2	Previsão de Consumo de Energia . . . . .	81
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	82
	<b>Bibliografia</b>	<b>83</b>



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Metodologia a ser aplicada na análise aos cenários de pré-compra de energia elétrica, bem como na sua previsão de consumo. . . . .	3
2.1	Fontes de geração de energia mundial em Tera Watt hora (TWh)/ano [2]. . .	7
2.2	Caracterização de energia transportada e respectivas perdas em Portugal, [3].	8
2.3	Produção de energia elétrica por tipo no ano de 2014 . . . . .	8
2.4	Instalação típica numa habitação no Brasil, usando um KeyPad meter, [7]. . .	11
2.5	Contadores utilizados no projeto-piloto <i>InovGrid</i> [10]. . . . .	12
2.6	Relação da temperatura no desempenho humano [15]. . . . .	15
2.7	Arquitetura rede neuronal projetada por [33]. . . . .	17
2.8	Comparação entre dados reais e previsão [33]. . . . .	18
2.9	Modelo de previsão de consumo de energia elétrica por meio de uma árvore de decisão [34]. . . . .	19
2.10	Consumo de energia elétrica ao longo de um dia [37]. . . . .	20
2.11	Comparação entre dados reais e precisão da previsão [37]. . . . .	21
3.1	Contador semelhante ao utilizado no projeto-piloto <i>InovGrid</i> [10]. . . . .	29
3.2	Arquitetura proposta do sistema SmartMeterOnline. . . . .	30
3.3	Caracterização do decaimento na série temporal. . . . .	36
3.4	Topologia de rede em Estrela, <i>Mesh</i> e <i>Cluster-tree</i> , [61]. . . . .	44
3.5	Implementações do microprocessador ESP8266EX por parte do fabricante AI-Thinker. . . . .	50
3.6	Sensor de corrente SCT-013-030 e respectivas dimensões. . . . .	51
3.7	Número de clientes e consumo anual por escalão de potência contratada em Baixa Tensão Normal em 2010, [9]. . . . .	52
3.8	Sensor de corrente SCT-013-030 com respetivo esquemático e representação de enrolamentos. . . . .	53
3.9	Funcionamento de um relé. . . . .	54
4.1	Equipamentos usados na aquisição de dados. . . . .	56
4.2	Consumo de energia real para dois casos desde outubro 2015 a junho 2016. .	57
4.3	Consumo de energia real, após aplicação de filtro, para dois casos nos primeiros 50 dias. . . . .	58

4.4	<i>Auto Correlation Function</i> (ACF) - autocorrelação do consumo de energia para o Caso A (em cima) e Caso B (em baixo) de outubro 2015 a junho 2016. . . .	58
4.5	ACF - autocorrelação do consumo de energia com uma e duas diferenciações, para o Caso A e B de outubro 2015 a junho 2016. . . . .	59
4.6	Figura de exemplo da placa de desenvolvimento utilizada, [76]. . . . .	62
4.7	Exemplo de calibração do sensor de corrente SCT-013-000 com divisor de tensão e limitador de carga, [70]. . . . .	63
4.8	Exemplo divisor de tensão . . . . .	64
4.9	Exemplo do circuito elaborado para um equipamento. . . . .	64
4.10	Exemplo de placa de circuito impresso (PCB) de duas camadas elaborado com o <i>software Fritzing</i> e implementada. . . . .	65
4.11	Quantidade de sites ativos tendo como base o tipo de Servidor, [78] . . . . .	67
4.12	Estrutura da interface <i>web</i> . . . . .	68
4.13	Interface gráfica - login, menu. . . . .	69
4.14	Interface gráfica - consultar contrato, adicionar equipamento. . . . .	70
4.15	Interface gráfica - consultar configurações, selecionar equipamento. . . . .	70
4.16	Interface gráfica - detalhe do equipamento, comprar energia. . . . .	71
4.17	Interface gráfica - escolher mês, mês de abril. . . . .	72
5.1	Gráficos de precisão de métodos analisados para o Caso A. . . . .	75
5.2	Gráficos de precisão de métodos analisados para o Caso B. . . . .	75
5.3	Consumo ao longo de um dia. . . . .	76
5.4	Exemplos de notificação por email. . . . .	76

## LISTA DE TABELAS

2.1	Diferenças entre países com pré-pagamento de energia, adaptado de [7]. . . . .	9
2.2	Temperatura recomendada no interior dos edifícios [12]. . . . .	14
2.3	Expressões que representam a previsão de consumos [31]. . . . .	17
2.4	Equipamentos envolvidos nas atividades consideradas [37]. . . . .	21
2.5	Comparação dos modelos em estudo analisados, adaptação de [47]. . . . .	23
3.1	Condições de acesso aos descontos sociais em 1 julho 2016 [49]. . . . .	27
3.2	Preços em 1 julho 2016 para Tarifa Social de venda a clientes finais ( $\leq 6,9$ kilo Volt Ampere (kVA)), [49] e Tarifa Normal [50]. . . . .	28
3.3	Comportamento teórico da ACF e <i>Partial Auto Correlation Function</i> (PACF) para alguns modelos . . . . .	37
3.4	Tabela comparativa dos protocolos sem fios analisados . . . . .	45
3.5	Comparação entre microcontroladores Atmel no Arduino, [67] . . . . .	47
3.6	Características técnicas do sensor SCT-013-030, [70]. . . . .	51
4.1	Tabela de resultados de previsão usando o método de Média Móvel Simples .	60
4.2	Tabela de resultados de previsão usando o método de Suavização Exponencial Simples . . . . .	61
4.3	Comparativo das base de dados mais utilizadas, [79]. . . . .	68
5.1	Tabela de resultados de previsão usando o método de Suavização Exponencial Simples e Média Móvel Simples de outubro a agosto 2016 . . . . .	74
5.2	Tabela de resultados de previsão aplicando a dois novos casos o método de Suavização Exponencial Simples e Média Móvel Simples de julho a agosto 2016	74



## ACRÓNIMOS

<b>A</b>	Ampere
<b>AC</b>	<i>Alternate Current</i>
<b>ACF</b>	<i>Auto Correlation Function</i>
<b>AIC</b>	<i>Akaike Information Criterion</i>
<b>ANN</b>	<i>Artificial Neural Network</i>
<b>ARIMA</b>	modelo Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel
<b>ARIMAX</b>	modelo Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel com variáveis exógenas
<b>ARMA</b>	modelo Auto-Regressivo de Média Móvel
<b>ARMAX</b>	modelo Auto-Regressivo de Média Móvel com variáveis exógenas
<b>ASP</b>	<i>Active Server Pages</i>
<b>AVAC</b>	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
<b>BLE</b>	<i>Bluetooth Low Energy</i>
<b>BTN</b>	Baixa Tensão Normal
<b>CGI</b>	<i>Common Gateway Interface</i>
<b>EB</b>	<i>Energy Box</i>
<b>EDP</b>	Energias de Portugal

## ACRÓNIMOS

---

<b>ERSE</b>	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<b>GHz</b>	Giga Hertz
<b>GPL</b>	<i>General Public License</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>
<b>GWh</b>	Giga Watt hora
<b>HAN</b>	<i>Home Area Network</i>
<b>HTML</b>	<i>HyperText Markup Language</i>
<b>HTTP</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<b>I2C</b>	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
<b>IDE</b>	<i>Integrated Development Environment</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IoT</b>	Internet das Coisas
<b>kbps</b>	kilo bit por segundo
<b>kVA</b>	kilo Volt Ampere
<b>kWh</b>	kilo Watt hora
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i>
<b>MAE</b>	<i>Mean Absolute Error</i>
<b>MAPE</b>	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
<b>Mbps</b>	Mega bit por segundo
<b>ME</b>	<i>Mean Error</i>

<b>MHz</b>	Mega Hertz
<b>MMS</b>	Média Móvel Simples
<b>MPE</b>	<i>Mean Percentage Error</i>
<b>NA</b>	Normalmente Aberto
<b>NF</b>	Normalmente Fechado
<b>OCDE</b>	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
<b>PACF</b>	<i>Partial Auto Correlation Function</i>
<b>PAN</b>	<i>Personal Area Network</i>
<b>PCB</b>	Placa de Circuito Impresso
<b>PHP</b>	<i>Hypertext Preprocessor</i>
<b>PLC</b>	<i>Power Line Communication</i>
<b>PWM</b>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<b>RAM</b>	<i>Random Access Memory</i>
<b>REN</b>	Rede Eléctrica Nacional
<b>RF</b>	Rádio Frequência
<b>RFID</b>	<i>Radio Frequency IDentification</i>
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Squared Error</i>
<b>Rp</b>	Razão de previsão
<b>SEH</b>	Suavização Exponencial de Holt
<b>SEHW</b>	Suavização Exponencial de Holt Winters

## ACRÓNIMOS

---

<b>SES</b>	Suavização Exponencial Simples
<b>SPI</b>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<b>SVM</b>	<i>Support Vector Machine</i>
<b>TWh</b>	Tera Watt hora
<b>UART</b>	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i>
<b>W</b>	Watt
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WPAN</b>	<i>Wireless Personal Area Network</i>



## INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento

Atualmente, em Portugal, no mercado residencial, os consumidores não têm muitas opções de faturação nem de monitorização do seu consumo de energia elétrica. A implantação de uma rede inteligente (*Smart Grid*), implementada atualmente num projeto piloto em Évora, poderia providenciar alguma flexibilidade na hora de se optar por um plano de pagamento por este serviço.

A energia elétrica, em Portugal, é faturada atualmente apenas em pós-consumo. Esta maneira convencional de cobrança da energia elétrica é basicamente dividida em três etapas: o consumo da energia, a leitura feita pela entidade distribuidora trimestralmente e/ou pelo próprio consumidor mensalmente, e o pagamento da conta de energia elétrica ao final do mês, tendo por base uma estimativa, quando o consumidor não comunica as leituras regularmente.

O meio de pagamento do sistema pré-pago, em foco neste trabalho, é semelhante ao sistema pré-pago implementado no serviço de telecomunicações. O consumidor compra créditos de energia elétrica e, enquanto possuir esses créditos, pode usufruir da energia.

O sistema convencional, atualmente implementado em Portugal, é usado há já muito tempo e tem regulamentação consolidada. O sistema pré-pago ainda não está implementado por variadas questões, entre as quais a não existência de contadores com tecnologia que o permita (excluindo o projeto de Évora *InovGrid*), para além de ainda não existir uma regulamentação definida. Por estes motivos, o sistema pré-pago irá ser analisado através do estudo de países que adotaram este sistema há mais tempo.

Um dos principais desafios de uma rede inteligente, *Smart Grid*, é a análise da grande quantidade de dados que é obtida a partir dos diferentes sensores e medidores instalados

num ambiente doméstico/industrial. Portanto, é necessário adquirir os dados de forma inteligente, tendo em consideração aspetos como a integridade dos dados, economia no seu armazenamento (obter apenas a quantidade necessária) e a carga de processamento de dados em espaços temporais. Outro assunto abordado neste trabalho será o estudo e adoção do melhor modelo que permita monitorizar, aconselhar ou mesmo desligar/ligar alguns aparelhos sedentos de energia (por exemplo, máquina de lavar roupa, ar condicionado) remotamente ou localmente. Para ir mais além na redução de consumo de energia em ambiente doméstico, os equipamentos devem ser desligados em vez de se manterem em *standby*. Pode dar-se o caso de não existir ninguém em casa num determinado momento, não havendo assim nenhuma oportunidade de desligar qualquer aparelho deixado em *standby*. Sendo, neste caso, significativamente importante ter controlo sobre os aparelhos remotamente.

Com a globalização a dominar o mundo dos negócios, a facilidade de comunicação, a rapidez nas transações e a interdependência económica entre as nações, as empresas necessitam cada vez mais de uma política de produção que vise o menor custo e uma maior produtividade, resultando consequentemente numa alta competitividade. Isto requer um processo contínuo de melhoria dos produtos e procedimentos nas várias etapas de produção e, para tal, devem ser traçadas políticas de gestão com vista a melhorar a produção de uma empresa. Tendo isto em consideração, as empresas necessitam de uma metodologia de previsão que seja eficiente e confiável, de modo a que os custos de produção e transporte sejam reduzidos. A escolha da melhor ferramenta de previsão, por meio da análise de dados históricos disponíveis, será um dos temas centrais deste trabalho, a par do sistema de pré-pagamento de energia elétrica.

### 1.2 Problema e Motivação

O sistema pré-pago de energia elétrica ainda não está implementado em Portugal, nem existe regulamentação definitiva. É um sistema de taxação de energia que pode ser muito benéfico, uma vez que, em tese, com a implantação do sistema pré-pago de energia elétrica, haveria uma redução de perdas comerciais e desperdícios de energia por parte dos consumidores aderentes, através de uma melhor consciencialização do consumo.

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o estudo de um sistema pré-pago de energia elétrica, propondo um modelo a implementar.

- Estudar as opções adotadas por outros países que utilizam o sistema pré-pago de energia e sugerir para Portugal uma proposta, tendo em vista a sua eficiência e, facilidade de uso e implantação.
- Comparar o sistema pré-pago com os pós-pagos atualmente existentes.

- Estudar qual o modelo mais aconselhado, tendo em vista a previsão de consumo de energia elétrica na habitação de cada consumidor.
- Estudar e propor um modelo de monitorização de consumos, tendo como objetivo aconselhar o consumidor de maneira a atingir o seu objetivo pré-definido aquando da pré-compra de energia elétrica.
- Descrever os principais problemas da solução proposta.

## 1.4 Metodologia de Trabalho

Para a elaboração deste trabalho, foi considerada a metodologia de trabalho [1], representada na figura 1.1.



Figura 1.1: Metodologia a ser aplicada na análise aos cenários de pré-compra de energia elétrica, bem como na sua previsão de consumo.

Sendo descrito, ao certo, qual o significado de cada etapa/bloco de seguida [1]:

- **Identificação do problema:** é uma etapa importante, visto que consiste em encontrar e definir qual o problema e suas características.
- **Investigação:** este passo define a parte em que toda a informação relativa à caracterização do problema identificado anteriormente é obtida, com base em livros, artigos e projetos científicos existentes na área em causa.
- **Formulação da hipótese:** nesta etapa, efetua-se a criação de uma hipótese de solução para o problema proposto, com base em toda a investigação previamente feita, de maneira a especificar e a focar melhor os resultados desejáveis.

- **Implementação:** tendo em vista a anterior caracterização do problema e identificação da hipótese, segue-se para a realização do desenvolvimento de ferramentas que vão permitir realizar posteriormente um teste, de forma a ser possível retificar eventuais problemas existentes no decorrer do projeto.
- **Validação da hipótese:** fase em que são aplicados diversos testes, para que se consigam obter resultados viáveis, que possam ser utilizados na fase em que se vai impor uma análise e interpretação dos dados obtidos, sendo depois verificada a validação da hipótese proposta. Assim sendo, caso os resultados gerados sejam satisfatórios e correspondam às previsões previamente estabelecidas, responde-se ao problema imposto, permitindo validar a hipótese; caso os resultados obtidos não sejam os esperados, deverá ser formulada a nova hipótese, por forma a aperfeiçoar a abordagem inicial.
- **Publicação dos resultados:** para este passo final, de acordo com o resultado da experimentação do trabalho de investigação, uma publicação de resultados e conclusões será efetuada, sendo posteriormente finalizado por um documento sobre a hipótese, tal como irá ser esta dissertação.

### 1.5 Formulação da Questão de Pesquisa

Esta dissertação tem como objectivo tirar vantagem da instalação de um smart meter numa habitação para previsão do consumo de energia eléctrica. A questão de pesquisa que se coloca é:

*Qual a forma adequada de prever o consumo de energia eléctrica com um grau de precisão razoável, usando um smart meter que permita o cenário de pré-compra de energia?*

Uma hipótese de resposta para esta questão pode basear-se na utilização de dispositivos adicionais, que ajudem na monitorização dos equipamentos que mais contribuem para esse consumo. Para se obter esta solução pretende-se desenvolver um dispositivo que permita monitorizar uma determinada tomada, enviando os valores de consumo, para a mesma plataforma do smart meter. A concepção deste sistema tem como objectivo fornecer uma plataforma que permita monitorizar cada equipamento, com vista a ajudar o consumidor a ligar e desligar cargas automaticamente para controlar o limite definido inicialmente, com a energia comprada.

## 1.6 Estrutura do Documento

Este documento de dissertação está organizado em seis capítulos:

1. Introdução
2. Estado da Arte
3. Arquitetura Proposta e Tecnologias
4. Implementação
5. Resultados Experimentais
6. Conclusão

No primeiro capítulo, destinado à introdução, é feito um enquadramento do tema, referindo os principais problemas e motivações para o desenvolvimento do projeto. De seguida, são especificados os objetivos que se pretendem atingir, bem como a metodologia a utilizar.

O estado da arte, no segundo capítulo, representa uma visão geral dos temas abordados na realização do projeto. Tendo em conta a sua complexidade intrínseca, em relação às especificações de alguns dos assuntos estudados neste projeto, são introduzidos apenas as principais características dos temas abordados, o seu funcionamento geral, o enquadramento histórico e uma explicação resumida dos temas.

O terceiro capítulo é referente à caracterização da arquitetura proposta e, especificações técnicas da tecnologia utilizada.

No capítulo quatro é apresentada toda a implementação prática dos elementos necessários à realização do projeto. De modo a não tornar as explicações da implementação demasiado complexas e de difícil interpretação, as principais especificações teóricas das tecnologias utilizadas são mencionadas com mais detalhe no capítulo 3.

O quinto capítulo é destinado à apresentação dos resultados experimentais, aos testes preliminares e validação dos resultados obtidos.

Por último, o capítulo seis é referente às conclusões obtidas após a realização do projeto, contendo um balanço dos resultados face aos objetivos inicialmente propostos.



## ESTADO DA ARTE

## 2.1 O Consumo de Energia Elétrica

O sector da energia é um dos sectores de atividade sobre o qual a comunidade científica ainda hoje se debruça seriamente. Entender a progressão ou o modo como este sector é sustentado, é compreender as diferentes necessidades da população, das empresas e as próprias questões ambientais.

A energia elétrica pode ser gerada com recurso a diferentes tecnologias, embora as mais comuns sejam a termoelétrica, com cerca de 67% de quota de mercado, as energias renováveis, como a hidroelétrica e a eólica com 16% e, por fim, a termonuclear com 19% (ver figura 2.1). Todas elas objetivam a movimentação de turbinas de um gerador, alterando apenas o método a que recorrem para atingir esse fim. Assim, a termoelétrica utiliza diferentes fontes de calor (por exemplo, carvão, gás ou madeira) para aquecer caldeiras de água que, por sua vez, libertam vapores que movem as turbinas de um gerador. As restantes utilizam, respetivamente, o potencial hídrico existente nos rios, o vento e a reação nuclear para movimentar essas mesmas turbinas.

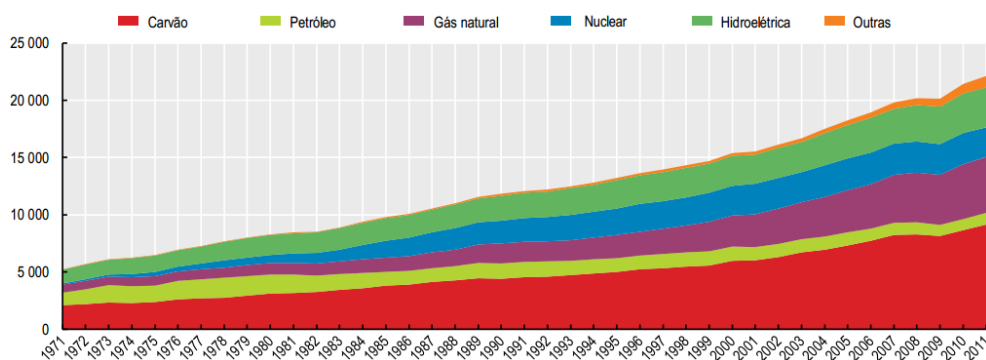


Figura 2.1: Fontes de geração de energia mundial em TWh/ano [2].

Toda a energia produzida é depois colocada na rede de transporte de modo a conduzi-la até aos centros de consumo. Em Portugal, esta tarefa é assegurada pela Rede Eléctrica Nacional (REN), estando sempre sujeita a perdas consideradas relativamente baixas, ver figura 2.2(a). O consumo de energia elétrica junto da população é posteriormente medido em kilo Watt hora (kWh), embora vejamos com regularidade referências a Giga Watt hora (GWh) ou TWh associado à produção.

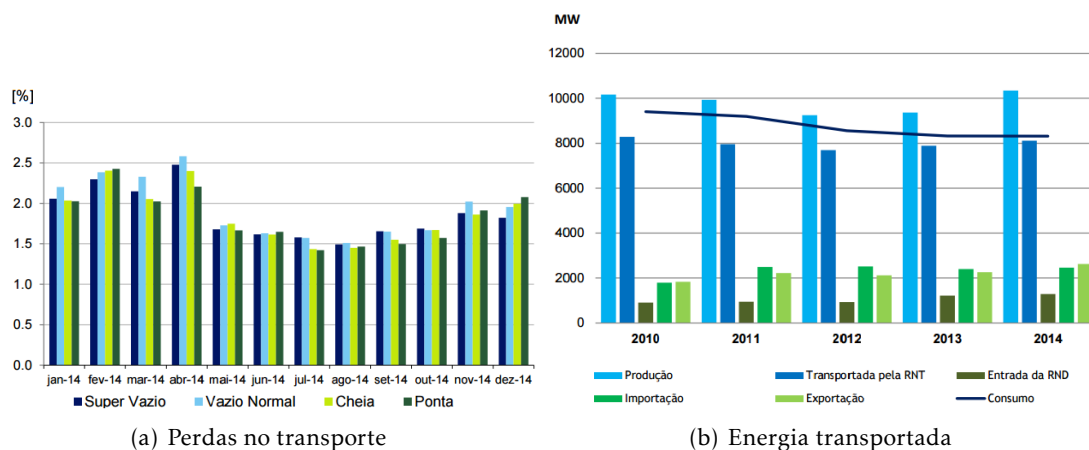


Figura 2.2: Caracterização de energia transportada e respetivas perdas em Portugal, [3].

Tal como já foi mencionado, o crescimento no consumo energético tem sido praticamente constante ao longo das últimas quatro décadas. Atualmente, são grandes potências mundiais como Estados Unidos, China, Japão ou Rússia as responsáveis pelos maiores consumos elétricos [4]. Apesar de não ocupar os lugares cimeiros, Portugal, em 2014, consumiu cerca de 4400 kWh *per capita*, demonstrando que o consumo elétrico é um ponto chave no orçamento das famílias e empresas [5].

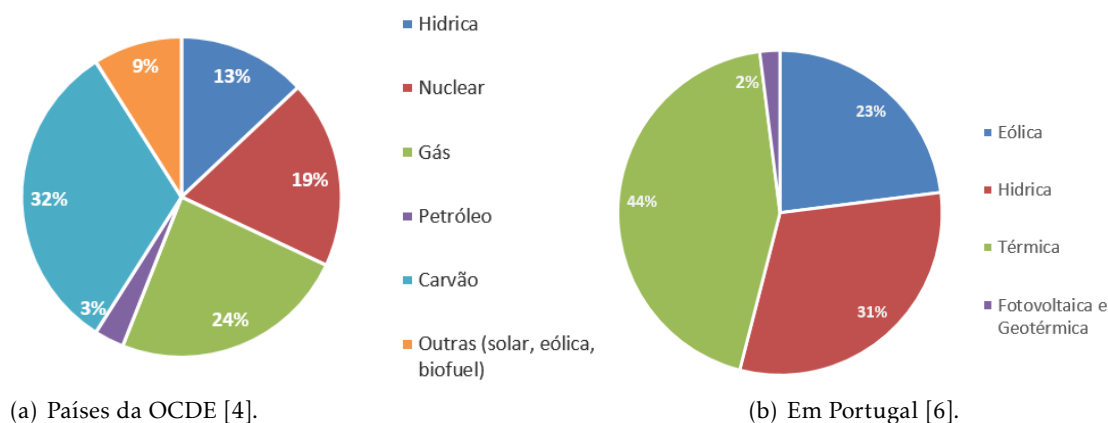


Figura 2.3: Produção de energia elétrica por tipo no ano de 2014



## 2.2 O Pré-Pagamento de Energia Elétrica

Os avanços tecnológicos nos sectores da eletrônica e dos sistemas de informação permitiram que, a partir da década de 90, muitas empresas de distribuição de energia elétrica, de vários países em todo o mundo, pudessem utilizar o sistema de pré-pagamento neste sector como uma modalidade alternativa ao faturamento convencional. Tal funcionalidade foi adotada no Reino Unido, Austrália, em alguns países africanos, bem como na América do Sul, nomeadamente no Peru, Colômbia e Argentina (ver tabela 2.1).

Tabela 2.1: Diferenças entre países com pré-pagamento de energia, adaptado de [7].

País	Tipo de medidor	Horário sem corte de energia	Crédito de emergência	Diferenças
Reino Unido	<i>KeyPad meter</i>	Não tem	Geralmente 5 Libras	Muito semelhante ao Brasil.
Irlanda do Norte	<i>KeyPad meter</i>	16:00 às 8:00	Não	Tarifa mais barata que a tarifa convencional. Facilidade em adicionar créditos (telefone e internet).
Tasmânia	<i>Card meter</i>	Novo assinante: 14:00 às 8:00 Antigos assinantes: 20:00 às 8:00	Pelo menos 10 Dólares	Valor do crédito de emergência é revisto a cada dois anos.
Argentina	Diversos	Não tem	Não	Subsídio do governo: o distribuidor de energia credita 0,0008 kWh a cada 15 segundos, para que o consumidor possa usar. Essa energia pode ser acumulada até 0,2 kWh/hora e 5 kWh por dia
Bélgica	Diversos	Não tem	Não	Cada residência recebe anualmente 100 kWh, mais 100 kWh por membro da família que mora na mesma residência. Idosos e deficientes recebem 500 kWh por ano como benefício da tarifa social local.
África do Sul	Diversos	Não tem	Não	Famílias carentes recebem 50 kWh como subsídio do governo.
Brasil	<i>KeyPad meter</i>	17:00 às 8:00	Cerca de 10 Reais	Tarifa Social: 30 kWh Promoções: quanto mais crédito comprar, menor o preço.

A experiência desses países tem evidenciado que o pré-pagamento possibilita ao consumidor uma melhor gestão do seu consumo de energia elétrica, porque permite decidir exatamente quanto e quando consumir, o que tem contribuído para uma redução no consumo de energia elétrica.

Da pesquisa bibliográfica realizada no âmbito desta dissertação, verificou-se que o pré-pagamento tem tido boa aceitação e satisfação dos consumidores, principalmente por aqueles que possuem dificuldades no pagamento ao seu fornecedor de energia [7].

Em Portugal, este método de pré-pagamento não é novo, pois tem sido amplamente utilizado em diversos sectores, tais como os telefones móveis, títulos de transportes públicos, entre outros, o que indica que a sua implementação poderá ser viável também no sector elétrico, gerando benefícios para o consumidor, produtor e para a sociedade.

### 2.2.1 Análise às Opções de Implementação

A análise às opções de implementação focar-se-á essencialmente no Brasil, devido a ser o país que, segundo foi possível apurar, implementou este sistema há menos tempo (em 2014), e ter condições semelhantes aos países referidos anteriormente.

O Brasil iniciou o processo no ano de 2011, tendo ficado disponível em 2014 para adesão por parte do consumidor, sendo a mesma voluntária e sem obrigação/fidelização. Além disto, fica ao critério do distribuidor a decisão de oferecer a modalidade na sua área de concessão [7].

O sistema adotado tem como linhas de funcionamento os seguintes princípios [8]:

- O consumidor recebe crédito inicial de 20 kWh, a ser descontado na compra subsequente.
- Posteriormente, poderá comprar novos créditos quando quiser e quantas vezes de-sejar, sendo 5 kWh o montante mínimo de compra.
- A venda dependerá da estratégia que o distribuidor adotar, o que pode ocorrer por meio de agentes autorizados pelo distribuidor ou, inclusive, pela Internet.
- A tarifa de pré-pagamento é igual à do pós-pago.
- O distribuidor poderá conceder descontos por sua conta e risco para incentivar os consumidores a aderirem à novidade.
- O consumidor pode voltar ao modelo pós-pago a qualquer altura, sendo que o pedido deve ser efetivado no prazo máximo de 30 dias.

Aquando da escolha da tecnologia de contadores pelo Brasil, existiam no mercado os seguintes tipos de contadores [7]:

- Inteligentes - usando tele-contagem ou rede inteligente.

- Isolados - tipo "split"(bi-corpo), também referidos como Keypad/Card meter, em que existe um aparelho de interface para o consumidor, colocado dentro de casa, o qual, por sua vez, está ligado a um segundo, no exterior, responsável pelas leituras de consumo.

O Brasil optou por usar o sistema implementado pela Colômbia em 2009 e pela Argentina em 2005, que consiste em colocar contadores bi-corpo representados na figura 2.4. No Brasil, o consumidor é notificado quando terminar o seu *plafond* através de alarmes visuais e sonoros. Caso seja necessário, o consumidor poderá solicitar crédito de emergência de 20 kWh, em qualquer dia e hora da semana, sendo pago pelo consumidor na primeira compra subsequente.

O Brasil definiu que os consumos de energia elétrica (kWh), adquiridos pelos consumidores não têm caducidade e podem ser comprados em qualquer agente autorizado, por meio de um cartão magnético ou de um código de 20 dígitos atribuídos previamente, como os seus congêneres latino-americanos.

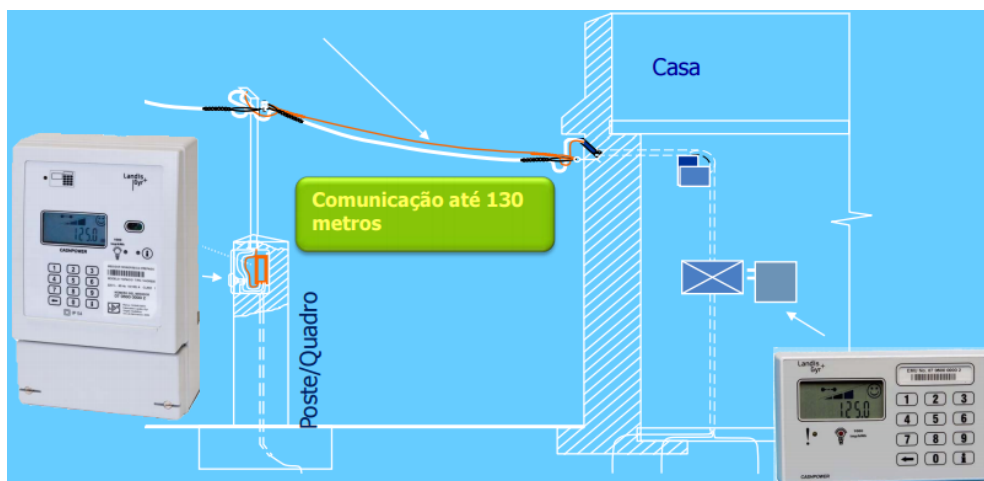


Figura 2.4: Instalação típica numa habitação no Brasil, usando um Keypad meter, [7].

Do ponto de vista dos operadores de rede de distribuição em Portugal, as potenciais vantagens associadas referidas em [9] são:

- Contributo para um aumento da eficiência energética, por mudança de comportamento dos consumidores, incluindo a transferência de consumos das horas de ponta/cheia para vazio e consequente redução de consumos.
- Criação de uma plataforma para novos serviços e produtos, nomeadamente planos de descontos com parceiros.
- Importância da bidirecionalidade de comunicações com o contador para capturar benefícios.
- Possibilidade de o operador efetuar operações remotamente, por exemplo, parametrização, corte ou religação.

- Possibilidade de efetuar leituras remotamente, evitando custos relativos a pessoal para a recolha local de leituras, eliminando também a necessidade de estimativas.
- Possibilidade de obter mais informação (diagramas de carga, perfis, energia reativa, cavas de tensão), bem como redução de perdas técnicas, por redução de consumo e melhor informação sobre a tensão (por exemplo, equilíbrios de fase).

Trazendo também preocupações relativas a segurança, pois, apesar de a interface entre o contador e a porta *Home Area Network (HAN)* ser considerada fundamental para a adequada captura dos benefícios, esta representa uma eventual brecha de segurança que tem de ser acautelada. Adicionalmente, a porta *HAN* poderá vir a permitir um alargado leque de serviços proporcionados por terceiros (que não o operador da rede de distribuição), o que poderá significar a responsabilização do operador por manter a porta *HAN* ativa, sendo que esta fronteira de responsabilidades assume particular importância [9].

Em Évora, Portugal, foi implementado um projeto piloto, em abril de 2010, denominado *InovGrid*, cuja conclusão da fase de implementação no terreno ocorreu em maio de 2011. Este foi um projeto escolhido como caso de estudo pela Comissão Europeia em 2011.

Ao abrigo deste projeto foram instalados, em todas as habitações, novos contadores, nos quais se destaca a modularidade, muito importante, pois permite diferentes tecnologias, usando a porta *HAN*, nomeadamente *General Packet Radio Service (GPRS)* (útil em zonas mais remotas) e *Radio Frequency IDentification (RFID)* para leituras presenciais de rotina, entre outras.

Foram atingidos os objetivos propostos, como a informação de consumos parcelares, emissão de avisos e alarmes, informação qualitativa do consumo e preços no *display*.

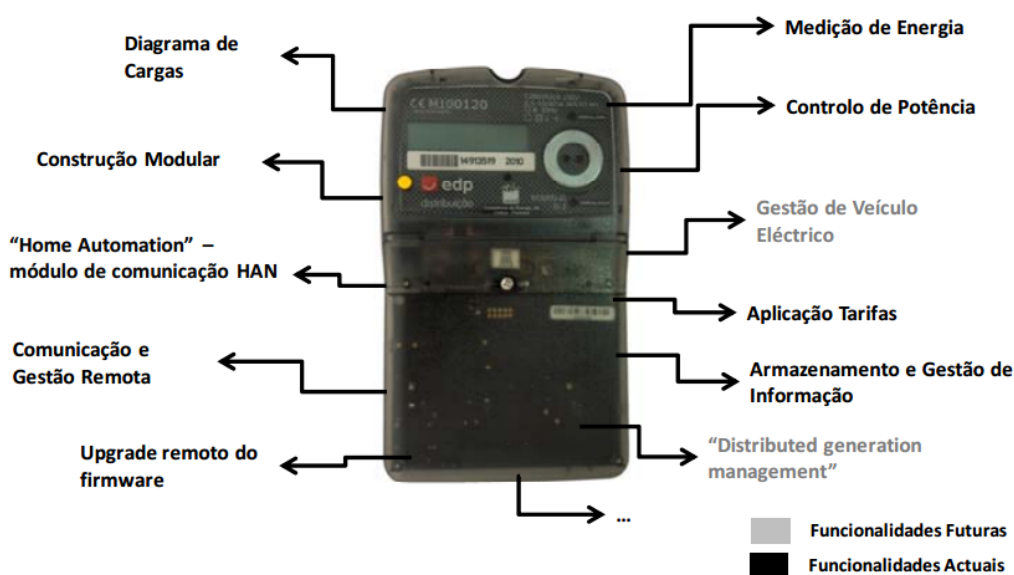


Figura 2.5: Contadores utilizados no projeto-piloto *InovGrid* [10].

## 2.3 Avaliação do Consumo de Energia Elétrica

Em dezembro de 2002 foi aprovada uma diretiva europeia sobre o consumo energético dos edifícios [11], que exige que os países membros desenvolvam metodologias capazes de:

- Calcular o consumo energético dos edifícios, dos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC).
- Estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética para os edifícios que venham a ser construídos no futuro e aplicar esses requisitos nos edifícios existentes.
- Desenvolver um sistema de certificação energética para os edifícios.
- Inspeccionar regularmente os sistemas de aquecimento e ar condicionado.

O consumo energético dos edifícios depende significativamente de determinados critérios estabelecidos para os seus sistemas, critérios esses que também afetam a saúde, produtividade e o conforto dos seus ocupantes. No caso dos sistemas AVAC, esses critérios (isto é, temperatura mínima no inverno e máxima no verão) serão usados para calcular a carga de aquecimento e arrefecimento e, assim, ajudar a garantir que dentro de determinado departamento de um edifício, estes limites de temperatura sejam cumpridos. Para cada tipo de edifício existem diferentes parametrizações destes limites (ver tabela 2.2) em que a categoria A tem uma tolerância de  $\pm 0.2\%$  enquanto que a C tem  $\pm 0.7\%$ .

Comparando, por exemplo, um escritório e uma loja comercial, facilmente se consegue compreender que este último, no inverno, não carece de uma temperatura tão elevada, uma vez que os seus ocupantes deslocam-se a pé de um lado para o outro, enquanto que, no verão, é necessária uma temperatura mais reduzida, também pelas mesmas razões. Já nos edifícios que não possuem sistema AVAC, os mesmos critérios deverão ser cumpridos. Contudo, para os controlar será preciso recorrer a outro tipo de estratégias como, por exemplo, criar sombras para que a luz solar não sobreaqueça o edifício ou abrir janelas.

As categorias referenciadas na tabela 2.2 correspondem ao nível de exigência requerido por determinado edifício. Relativamente ao controlo de iluminação, bem como ao de humidade, existem igualmente critérios a ser cumpridos, dependendo do tipo de edifício. No que concerne aos sistemas de humidificação e de desumidificação do ar, tipicamente apenas são necessários em edifícios de cariz especial, como hospitais ou museus. Todos estes critérios deverão ser definidos aquando do processo de desenho dos edifícios. Contudo, nos que já se encontram construídos, também poderá existir esta parametrização.

Existem diversos métodos para o cálculo do consumo de energia elétrica, sendo que este pode ser realizado numa base sazonal, mensal ou até de hora a hora. Em [12], explicam que para um cálculo sazonal e mensal são usados os valores parametrizados inicialmente para a temperatura de aquecimento e arrefecimento. Para um cálculo de hora a hora, deverá ser usado o ponto médio da temperatura durante a hora avaliada.

Tabela 2.2: Temperatura recomendada no interior dos edifícios [12].

<b>Tipo de Edifício</b>	<b>Categoria</b>	<b>Aquecimento [°C] (Inverno)</b>	<b>Arrefecimento [°C] (Verão)</b>
Edifícios residenciais: quarto, cozinha, dispensa - Sedentário	A	21	25.5
	B	20	26
	C	18	27
Edifícios residenciais: dispensa, hall, sótão Não sedentário	A	18	-
	B	16	-
	C	14	-
Escritório - Sedentário	A	21	25.5
	B	20	26
	C	19	27
Restaurante ou Café Sedentário	A	21	25.5
	B	20	26
	C	19	27
Grandes superfícies comerciais - Não sedentário	A	17.5	24
	B	16	25
	C	15	26

Para ser feita uma avaliação do consumo de energia elétrica, é necessário executar uma medição num determinado período temporal, para se poder concluir se há realmente poupança de energia relativamente ao previsto. Em [13], analisaram vários estudos feitos por diversos autores em países distintos e concluíram que as variações que existem relativamente à previsão de consumo de energia elétrica e o que efetivamente foi consumido, advém de fatores como:

- O número total de horas de ocupação de determinado edifício pode diferir do que foi inicialmente concebido.
- A construção final do edifício pode diferir significativamente relativamente ao projeto inicial e às suas previsões de consumo.
- As tecnologias propostas para poupança energética podem não ser tão eficazes como inicialmente fora previsto.
- As ligações à corrente são geralmente muito diferentes do assumido.
- A existência de uma lacuna na transferência do conhecimento por parte das equipas de projeto e os utilizadores finais.

Enquanto os efeitos da temperatura no conforto estão perfeitamente estudados, os efeitos da temperatura na performance têm sido desprezados ao longo do tempo. Uma temperatura do ar inadequada pode influenciar a produtividade de forma indireta, já que pode causar sintomas como irritação dos olhos, nariz e garganta, irritação da pele e até más sensações relacionadas com o odor ou sabor [14]. É complicado de controlar as condições

térmicas devido a diversos fatores, como estruturas de refrigeração insuficientes, áreas demasiado grandes ou a conceção inadequada da infraestrutura. Adicionalmente, estas condições térmicas podem variar consideravelmente ao longo do tempo, uma vez que as condições exteriores podem mudar (por exemplo, o espaçamento entre os edifícios após uma reestruturação urbana).

Nesse sentido, os autores em [15], realizaram um estudo onde demonstraram que a performance decaía 2% a cada aumento de  $1^{\circ}\text{C}$  para um intervalo de temperatura entre os  $25^{\circ}\text{C}$  e os  $32^{\circ}\text{C}$ , sendo que a temperatura ideal encontrada se situa entre os  $21^{\circ}\text{C}$  e os  $23^{\circ}\text{C}$  (ver figura 2.6).

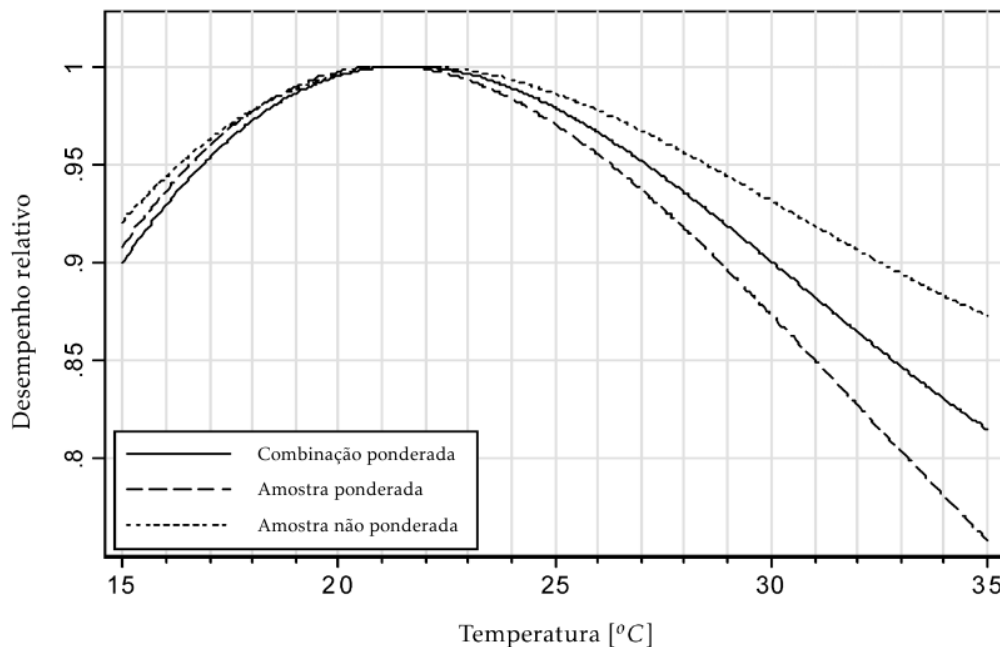


Figura 2.6: Relação da temperatura no desempenho humano [15].

Para alcançar estes resultados sobre a relação entre temperatura e produtividade, os autores utilizaram dados de sete locais de trabalho, dois referentes a ambientes laboratoriais e os restantes em *call centers*. O desempenho laboral dos primeiros foi medido com base na rapidez e eficácia das ações realizadas, enquanto que nos *call centers* se utilizou unicamente o tempo por chamada necessário pelo operador. A recolha de dados foi realizada em incrementos de  $10\text{ L/s}$  por pessoa, isto é, a razão entre a taxa de ventilação tipicamente expressa em  $10\text{ m}^3/\text{s}$  e o número de pessoas no espaço. O desempenho foi calculado com base na variação percentual do mesmo, isto é,  $(D_{i-1} - D_i)/D_{i-1}$  onde  $D_i$  representa o desempenho na  $i$ -ésima observação. Foram também aplicados três tipos de fatores de ponderação para enquadrar os resultados com o contexto real (por exemplo, uma tarefa pode ser mais relevante que outra), devidamente detalhados em [16].

## 2.4 Métodos de Previsão de Consumo

Uma vez que o consumo de energia elétrica tem um impacto considerável em termos sociais e ambientais, torna-se natural o interesse da comunidade científica em temáticas relativas à indústria energética, o qual se tem vindo a intensificar nas últimas duas décadas. Por outro lado, convém referir que a análise eficiente dos dados armazenados e relacionados com esta temática apenas é possível com recurso a computação, nomeadamente através de técnicas de *data mining*.

Os principais estudos existentes debruçam-se, para além da previsão de consumo de energia elétrica, na classificação e caracterização de perfis de consumo [17], na qualidade do sistema de distribuição elétrica [18], [19], [20] e na classificação de falhas na rede, estudadas por [21], bem como [22], e [23].

As técnicas mais utilizadas na literatura para lidar com estas problemáticas são as árvores de regressão [24], a regressão linear múltipla [25], as redes neuronais (*Artificial Neural Network* (ANN)) [26] e as *Support Vector Machine* (SVM) [27].

A título de exemplo, em [28] é apresentado um modelo capaz de obter um conjunto de classes que representam diversos perfis de consumo energético, recorrendo a um algoritmo de segmentação denominado de *K-Means* [29] e que originou 9 *clusters*. Posteriormente, foi construído um modelo de classificação, representando um conjunto de regras que permitiram classificar eficientemente cada consumidor no *cluster* anteriormente encontrado. Por sua vez, os autores em [30] utilizaram modelos de segmentação para analisarem as perturbações nos sistemas elétricos, com o objetivo de garantir o sucesso das operações inicialmente planeadas para um determinado sistema. Estes autores reconheceram anomalias no comportamento dos sistemas, especialmente no que diz respeito à sua proteção e performance. Para tal, classificaram o tipo de perturbação, bem como o local onde a mesma ocorreu, de modo a obter rápidas respostas.

Na literatura, encontram-se também trabalhos de relevo que utilizam as técnicas de *data mining*, na tentativa de modelar o consumo de energia elétrica de forma eficiente.

Os autores em [31], recorreram a regressões lineares múltiplas, em que analisaram dados relativos à cidade de Delhi nas quatro estações do ano, nomeadamente: quantidade de população ( $\psi$ ), temperatura ambiente ( $\alpha$ ), humidade relativa ( $\beta$ ), precipitação ( $\gamma$ ) e insolação ( $\delta$ ). Para evidenciar quais destes atributos têm maior influência no consumo de energia elétrica ao longo das diferentes estações, os autores recorreram ao teste estatístico *t-test*, formulando como hipótese nula a ausência de dependência entre consumo e determinado atributo, como se pode ver na tabela 2.3.

Estes resultados foram validados usando o coeficiente de determinação ou qualidade do ajuste  $R^2$ . Este coeficiente varia entre 0 e 1, e quanto maior for o seu valor, maior será a qualidade na previsão. Por exemplo, um  $R^2$  igual a 1 significa que o modelo se ajusta na perfeição ao conjunto de teste utilizado [32]. Os autores verificaram uma menor precisão para resultados obtidos na primavera, justificada com as constantes quebras de energia nos meses em questão. No que diz respeito às restantes três estações do ano,



Tabela 2.3: Expressões que representam a previsão de consumos [31].

Estação do ano	Expressão representativa	$R^2$
Primavera	$-0,48\delta - 0,318\beta + 43,612$	0,3868
Verão	$6,992\psi + 0,244\alpha - 44,219$	0,9925
Outono	$6,069\psi + 0,349\alpha + 0,005\gamma - 40,842$	0,9854
Inverno	$5,964\psi - 0,338\alpha - 25,468$	0,9725

obtiveram excelentes indicadores de que os atributos considerados podem ser essenciais para a problemática em questão.

Existem também outras abordagens, como o uso de redes neurais, adotado por [33], redes essas que foram utilizadas para estimar o consumo de energia elétrica num único edifício, uma vez que é uma técnica amplamente aceite e que oferece soluções para lidar com o problema de mapeamentos complexos. Os dados utilizados no seu estudo foram gerados tendo como atributos a estação do ano (verão e inverno), o tipo de isolamento (caracterizando a existência ou ausência de isolamento térmico em todas as paredes), a espessura das paredes (um atributo responsável por definir se o coeficiente de transferência de energia para o cálculo do consumo de energia elétrica é constante ou variável) e, também, a hora do dia.

Após vários testes para encontrar qual a melhor arquitetura para a rede neuronal final, chegou-se a uma arquitetura do tipo recorrente, composta por 4 camadas, conforme a figura 2.7. Esta é caracterizada pelas duas camadas obrigatórias (isto é, entrada e saída), por uma *hidden layer* e por uma camada denominada de *long term memory*, responsável por reter informações relevantes para o suporte da rede.

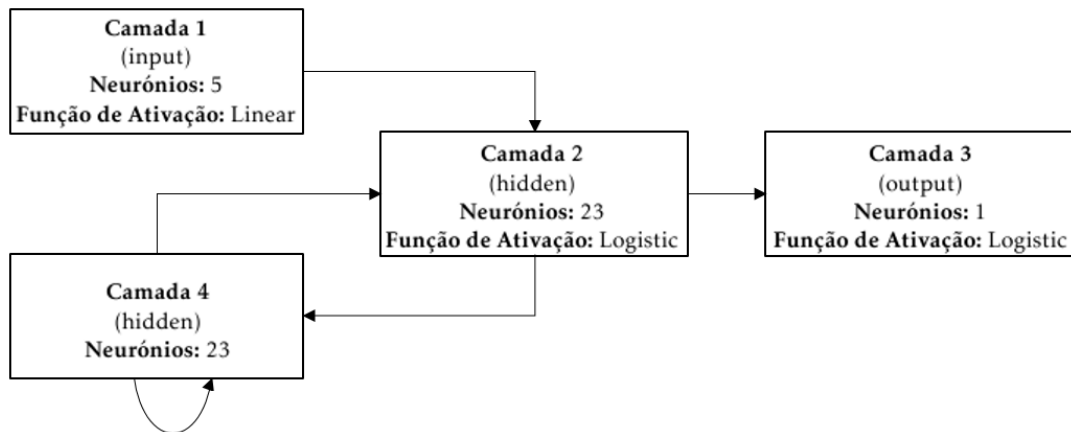


Figura 2.7: Arquitetura rede neuronal projetada por [33].

Depois de se atingir um patamar satisfatório, o processo de treino foi interrompido e um novo conjunto de teste completamente desconhecido foi utilizado para validar a precisão do modelo, sendo obtido um  $R^2$  de 0,9991. Se se atentar aos gráficos das figuras 2.8, é possível perceber que, para o caso do inverno, a correspondência entre os valores reais e os valores previstos é quase perfeita. Aliás, como se pode verificar, as duas linhas

são praticamente indistinguíveis. Já no verão, verifica-se uma ligeira variação.

Em suma, com este estudo, os autores, concluíram que as redes neurais apresentadas foram capazes de prever o consumo de energia elétrica com uma precisão bastante aceitável, como se pode verificar pelo valor de  $R^2$  encontrado.

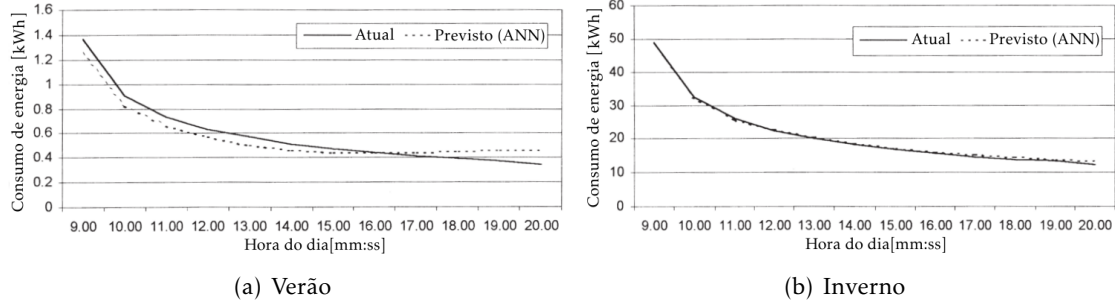


Figura 2.8: Comparação entre dados reais e previsão [33].

Por sua vez em [34], os autores realizaram um estudo comparativo entre diferentes técnicas de previsão de consumo de energia elétrica, com base em dados relativos à cidade de Hong Kong. Para tal, foi recolhida informação de cerca de duas mil habitações (isto é, composição do agregado familiar, consumos elétricos semanais de equipamentos e dados gerais do edifício) em dois períodos distintos: verão e inverno. Os métodos selecionados neste estudo foram as regressões lineares múltiplas [25], as redes neurais [26] e árvores de decisão [35], tendo sido implementados através do *software SAS Enterprise Miner* [36].

Com as regressões lineares, uma das mais conhecidas técnicas para previsão, devido à sua simplicidade e interpretabilidade, obteve-se a estimativa para o valor esperado do consumo elétrico semanal. A equação (2.1) representa formalmente a regressão linear múltipla, onde  $\gamma_i$  é a variável dependente (isto é, o valor objetivo) e  $\omega_{ij}$  são as variáveis independentes da  $i$ -ésima observação,  $\beta_j$  os parâmetros de regressão e  $\varepsilon$  o erro aleatório segundo uma distribuição normal de média igual a zero e variância constante.

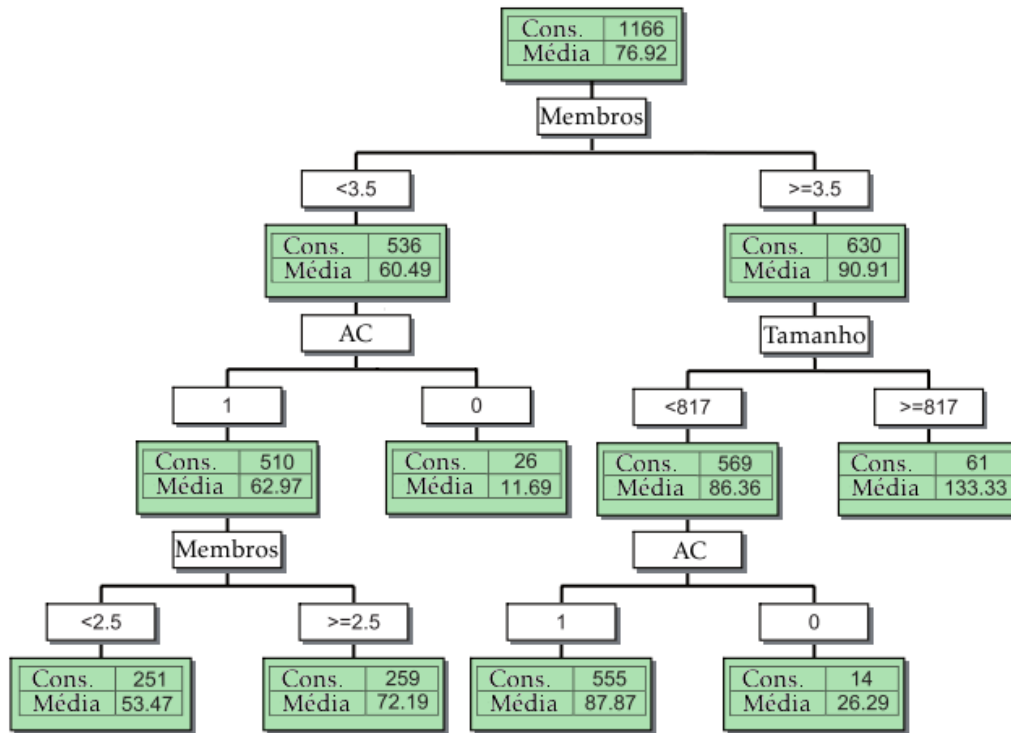
$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 + \omega_{i1} + \beta_2 + \omega_{i2} + \dots + \beta_j + \omega_{ij} + \varepsilon \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^n [\gamma_i - \gamma_{real(i)}]^2 \quad (2.2)$$

Para a estimativa de  $\gamma_i$ , foi utilizado o método dos mínimos quadrados, que considera o desvio de  $\gamma_i$  em relação ao valor esperado  $\gamma_{real(i)}$ , representado pela equação (2.2), sendo o resultado avaliado em função dos  $p$ -values fornecidos pelas regressões.

O outro modelo implementado utiliza as árvores de decisão como algoritmo de classificação, com o  $F$ -test como critério de partição e um nível de significância de 0.2 para evitar o crescimento desmedido do modelo. Graficamente, as árvores de decisão são representadas por nós que contêm testes unitários a um determinado atributo e ramos

descendentes correspondentes a possíveis valores desse mesmo atributo. Para uma melhor compreensão, ver figura 2.9. No contexto deste estudo, as folhas representam um nível de consumo energético semanal e o percurso até alcançar as mesmas representa as regras que definem o modelo de classificação.



**AC:** condicionado

**Tamanho:** tamanho da divisão em  $[m^2]$

**Membros:** número de habitantes

**Cons.:** consumo em  $[kWh]$

**Média:** consumo médio em  $[kWh]$

Figura 2.9: Modelo de previsão de consumo de energia elétrica por meio de uma árvore de decisão [34].

Neste campo, as árvores de decisão possuem uma fácil e intuitiva interpretação de resultados, bem como um baixo consumo de recursos computacionais, quando comparado com as restantes técnicas descritas anteriormente. No entanto, não se revelam tão eficientes na presença de ruído nos dados ou em atributos numéricos sem padrões suficientemente evidentes (por exemplo, séries temporais).

Para este estudo, os autores concluíram que todas as abordagens têm resultados relevantes, satisfatórios (por exemplo, *p-values* das regressões com ordens de grandeza de  $10^{-4}$ ) e muito semelhantes entre si. Nos três métodos utilizados, verificou-se que os consumos de energia elétrica variam efetivamente entre estações, sendo o ar condicionado e os equipamentos de aquecimento os principais responsáveis por grande parte do consumo no verão e no inverno, respetivamente. As redes neurais evidenciaram ainda a tipologia da habitação como uma variável de análise preponderante na previsão de consumos no

inverno. É ainda mencionada, embora não comprovada, a melhoria dos modelos com a incorporação de variáveis como a precipitação ou a velocidade do vento.

Com o mesmo objetivo em mente em [37], os autores desenvolveram um estudo para previsão do consumo de energia elétrica em casas inteligentes. O conceito de casas inteligentes está intrinsecamente ligado à evolução da domótica, tecnologia que permite a gestão automatizada de um edifício com o objetivo de facilitar ações e rentabilizar recursos, como anteriormente referido. Tomando por base a monitorização e reconhecimento de atividades através de sensores, esta tecnologia pode ser aplicada, por exemplo, na identificação da localização dos habitantes dentro de uma habitação [38], na automatização de processos com base na atividade humana dos habitantes [39], ou para gerar alertas de consumos de energia anormais [40].

Em [37] os autores desenvolveram um estudo que decorreu num edifício preparado para o efeito e com dois habitantes, onde todos os espaços estavam equipados com sensores que permitiam a medição de energia consumida, temperaturas e estado dos equipamentos (por exemplo, luzes ligadas, eletrodomésticos em uso). Apenas foram consideradas algumas atividades como alvo de previsão (ver tabela 2.4), apesar de todas possuírem uma duração temporal considerável e picos de consumo evidentes (ver figura 2.10).

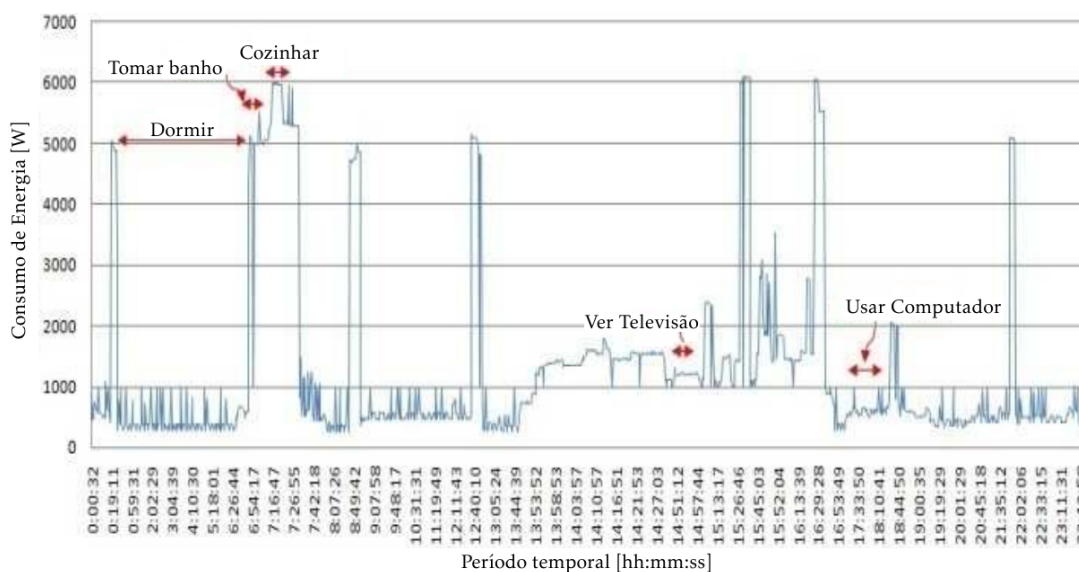


Figura 2.10: Consumo de energia elétrica ao longo de um dia [37].

As técnicas utilizadas para previsão foram *Naïve Bayes* [41], redes bayesianas [42], redes neurais e SVM. O algoritmo *Naïve Bayes* assume a independência entre atributos e utiliza o teorema Bayesiano para encontrar o valor de classe com maior probabilidade de acerto, dada uma instância  $y$ . Por seu lado, as redes bayesianas assumem a dependência condicional que normalmente é representada graficamente por um grafo acíclico e orientado.

Para a aprendizagem dos modelos, foram considerados dados como as atividades anteriores e seguintes, a duração de cada atividade, o número de sensores ativados e o estado

Tabela 2.4: Equipamentos envolvidos nas atividades consideradas [37].

Atividade	Equipamentos envolvidos
Usar computador	Computador, impressora
Dormir	-
Cozinhar	Micro-ondas, fogão e forno
Usar televisão	Televisão ou leitor multimídia
Tomar banho	Esquentador
Aparência	Secador de cabelo

dos equipamentos (isto é, ligado ou desligado). Estes mesmos dados foram recolhidos durante os períodos de verão e inverno. Quanto ao atributo classe, isto é, a quantia de energia necessária para um dia, foi discretizado em  $n$  intervalos iguais para todo o  $n \in [2...6]$  e validados com *3-fold cross validation*.

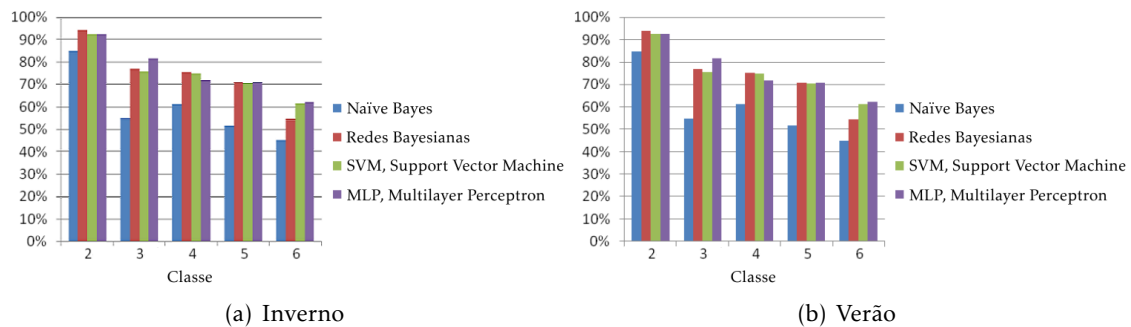


Figura 2.11: Comparação entre dados reais e precisão da previsão [37].

Os resultados obtidos por [37], representados na figura 2.11, demonstram que a precisão dos algoritmos está enquadrada entre os 60% e os 90%, sendo que quanto maior for o leque de valores possíveis para o atributo classe, menor é a precisão dos algoritmos. No que toca a resultados, os piores foram obtidos pelo algoritmo *Naïve Bayes*, pelo facto de assumirem a independência condicional entre atributos. Os restantes têm resultados semelhantes, apesar de os autores assumirem que são insuficientes para os considerar eficazes, perante o contexto em causa.

A principal razão apontada pelos mesmos é a dificuldade em monitorizar e prever consumos de equipamentos como aquecedores, uma vez que depende das temperaturas interiores e exteriores. Por outro lado, a própria atividade humana no interior de uma habitação é um fator imprevisível por si só.

Por sua vez em [43], os autores defendem que a previsão da potência elétrica utilizando métodos quantitativos pode ser feita através de vários modelos de regressão, em que a utilização de cada modelo depende basicamente do comportamento da série temporal que se deseja analisar.

Os métodos de séries temporais são baseados na suposição de que os dados possuem uma estrutura interna, como a autocorrelação, tendência ou variação sazonal. Portanto,

os métodos de previsão baseados em séries temporais são capazes de detetar e explorar essa estrutura. Os métodos mais frequentemente utilizados são: modelo Auto-Regressivo de Média Móvel (ARMA), modelo Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel (ARIMA), modelo Auto-Regressivo de Média Móvel com variáveis exógenas (ARMAX) e o modelo Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel com variáveis exógenas (ARIMAX).

Os modelos ARMA são normalmente utilizados para processos estacionários, enquanto que os modelos ARIMA são uma extensão dos ARMA, para processos não estacionários [44].

Destes últimos, destaca-se o modelo ARIMA por ser largamente utilizado na literatura, com especial relevo devido à metodologia *Box & Jenkins*, sendo estes dois investigadores os que mais contribuições fizeram ao nível da sua construção e aplicação.

A metodologia de *Box & Jenkins* consiste num processo constituído por 5 etapas de avaliação [45]:

- Estabelecer a estacionaridade da série. Caso esta não seja estacionária, é necessário proceder a sucessivas diferenciações da mesma até que se obtenha o pretendido.
- Identificar um modelo estacionário que se ajuste aos dados em estudo através de análise da série temporal, mais propriamente das suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial.
- Especificar o modelo e estimar os parâmetros do mesmo.
- Realizar testes de validação de forma a garantir que o modelo escolhido descreve os dados em estudo de forma adequada. Deve também ser feita uma análise aos resíduos e normalmente distribuído com média e variância constantes sendo que os resíduos não devem apresentar correlações entre eles.
- Após a verificação da adequabilidade do modelo, este estará pronto a ser utilizado para realizar a previsão.

Existem também outros tipos de modelos, nomeadamente os modelos de suavização que pertencem a uma classe de métodos de previsão, que se baseiam na ideia de que observações passadas contêm informações sobre o padrão da série temporal. O propósito destes métodos é distinguir um padrão de comportamento de qualquer outro ruído que possa estar contido nas observações da série e usar esse padrão para prever valores futuros da série. Dentro destes modelos de suavização encontramos a Média Móvel Simples (MMS), Suavização Exponencial Simples (SES), Suavização Exponencial de Holt (SEH) e Suavização Exponencial de Holt Winters (SEHW).

Destas serão mencionadas duas:

- MMS - Média Móvel Simples:

$$\hat{Z}_t(h) = \hat{Z}_{t-1}(h+1) + \frac{\hat{Z}_t - \hat{Z}_{t-k}}{k} \quad (2.3)$$

- SES - Suavização Exponencial Simples:

$$\hat{Z}_t = \alpha Z_t + (1 - \alpha) \hat{Z}_{t-1} (h + 1) \quad (2.4)$$

Sendo que  $h$  representa a previsão dos valores futuros,  $0 \leq \alpha \leq 1$  a constante de suavização, e  $Z_t$  a série temporal.

Enquanto que na média móvel simples as observações usadas para encontrar a previsão contribuem em igual proporção para o seu cálculo, na suavização exponencial simples as informações mais recentes são evidenciadas pela aplicação de um fator que determina essa importância [46]. Ou seja, a previsão de todos os valores futuros é dada pelo último valor exponencialmente suavizado, que pode ser interpretado como uma equação de atualização de previsão, quando tivermos uma nova observação. Além disso, a previsão feita de acordo com equação (2.4) reduz o problema de armazenamento de observações, pois pode ser calculada utilizando apenas a observação mais recente, a previsão imediatamente anterior e o valor de  $\alpha$ .

A tabela 2.5 sintetiza as técnicas de previsão descritas ao longo deste capítulo e usadas pelos diversos autores nos seus trabalhos e respectivas conclusões.

Tabela 2.5: Comparação dos modelos em estudo analisados, adaptação de [47].

<b>Método Usado</b>	<b>Horizonte de Tempo</b>	<b>Complexidade do Modelo</b>	<b>Precisão Modelo</b>	<b>Dados Necessários</b>	<b>Estudos Analisados</b>
Média Móvel Simples	Curto	Baixa	Média	Poucos	[46]
Suavização Exponencial Simples	Curto	Baixa	Média	Poucos	[46]
Regressão Linear Simples	Longo	Média	Alta	Muitos	[48]
Regressão Linear Múltipla	Longo	Média	Alta	Muitos	[31]
Auto Regressivos	Médio Curto	Média	Alta	Muitos	[45]
Redes Neurais	Médio Longo	Alta	Média Alta	Muitos	[33], [34] e [37]
<i>Support Vector Machines</i>	Médio Longo	Média Baixa	Média Alta	Muitos	[34] e [37]
Árvores de Decisão	Longo	Baixa	Média Baixa	Poucos	[34]
Redes Bayesianas	Médio Longo	Alta	Média Baixa	Muitos	[37]
<i>Naïve Bayes</i>	Médio Longo	Média Alta	Média	Muitos	[37]





## ARQUITETURA PROPOSTA E TECNOLOGIAS

Neste capítulo é feita uma abordagem sobre toda a arquitetura utilizada, bem como as tecnologias utilizadas no seu desenvolvimento.

Primeiramente, este capítulo foi sub-dividido em várias secções, das quais se apresentam apenas as principais. Na primeira secção (3.1), são apresentados os objetivos/requisitos que se pretendem alcançar com este tema de dissertação. Segue-se uma secção de enquadramento e recomendações na implementação do cenário de pré-compra de energia a aplicar em Portugal (secção 3.2). Na secção (3.3), é feita uma proposta de arquitetura, sendo posteriormente descritos, nas secções seguintes, os modelos de previsão de consumo abordados (secções 3.4 e 3.5), bem como as tecnologias consideradas na implementação da arquitetura proposta (secções 3.6, 3.7 e 3.8).

### 3.1 Requisitos

Esta secção especifica os requisitos necessários para o sistema que foi apelidado de Smart-MeterOnline, que visa criar uma arquitetura de um sistema inteligente, tendo por base a utilização de um contador inteligente fornecido pela Janz/Contar, semelhante aos usados no projeto *InovGrid* [10].

Esta ferramenta a ser desenvolvida visa permitir ao utilizador/consumidor final gerir com eficiência o uso de eletricidade na sua habitação, através da pré-compra de energia, aliando as previsões de consumo que visam providenciar uma redução e/ou controlo do consumo de energia elétrica (kWh). Visa também facilitar o seu uso através de uma rede, permitindo monitorizar o consumo remotamente em tempo quase real, controlar qualquer dispositivo remotamente (ligar/desligar), bem como notificar o utilizador que determinado equipamento ficou ligado/desligado, com base no seu histórico recente.

## 3.2 Recomendações na Implementação do Cenário de Pré-Compra de Energia Elétrica

O sistema pré-pago de energia ainda não está implementado em Portugal. Caso os distribuidores/fornecedores optem por iniciar a aplicação deste sistema, é necessário que a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), tenha em consideração uma regulamentação diferenciada para os diferentes tipos de consumidores deste sistema, a fim de evitar prováveis conflitos entre cliente e fornecedor. Nos países que o utilizam, este sistema já está implementado numa escala considerável e em todos eles existe um órgão regulador de energia para ajudar na relação entre cliente e distribuidor.

Uma das principais discussões e entraves em relação à implantação deste sistema, são as críticas e resistência de algumas pessoas, bem como de órgãos de defesa do consumidor. Por exemplo, no Brasil, estes alegam que o corte de energia fica mais facilitado com este sistema. Muitos são contra os cortes de energia pelo não cumprimento dos prazos de pagamento, uma vez que a energia elétrica é considerada como um serviço essencial, tal como o abastecimento de água.

Para evitar estas dificuldades, uma série de regulamentações deve ser imposta pela ERSE, de modo a promover a sua implementação, bem como a divulgação de benefícios que defendam o consumidor. A promoção deste sistema pode, de resto, vir a beneficiar muitos portugueses, principalmente os de classes mais baixas. É importante que as concessionárias pratiquem um sistema pré-pago diferenciado, em que os consumidores não se sintam ameaçados no que toca a cortes de energia e percebam as vantagens do sistema pré-pago. Isto pode ser feito de diversas maneiras, com base nas experiências internacionais abordadas no capítulo anterior.

As proteções ao consumidor do sistema pré-pago podem revestir-se de diversas formas, como os créditos de emergência que são usados na maioria dos países. Tudo isto deve ficar claro para a população, especialistas e órgãos de defesa do consumidor, para que percebam que o sistema pré-pago não é um sistema que tem como principal objetivo cortar a energia dos não cumpridores (expectável que aconteça em Portugal), mas sim um sistema que vem trazer flexibilidade e responsabilização de consumo por parte do consumidor, bem como a redução de custos para o fornecedor, que pode influenciar, de forma positiva, o consumidor.

Os créditos de emergência são utilizados como uma reserva de energia, ou seja, assim que os créditos do consumidor acabam, os de emergência são ativados, para que o consumidor não seja, de imediato, afetado pelo corte de fornecimento de energia. Estes créditos devem ser suficientes para consumo de 2 a 3 dias. Além disso, este crédito de emergência deve ser repostado assim que o consumidor compre novamente créditos. Por exemplo, um consumidor que possui vinte euros de crédito de emergência faz uma festa e gasta mais energia que o habitual, tendo que utilizar cinco euros do crédito de emergência. No dia seguinte, compra vinte euros de crédito e cinco euros serão usados para repor os créditos de emergência, ficando o consumidor com quinze euros de crédito, depois de debitados

### 3.2. RECOMENDAÇÕES NA IMPLEMENTAÇÃO DO CENÁRIO DE PRÉ-COMPRA DE ENERGIA ELÉTRICA

os cinco do crédito de emergência.

Além do crédito de emergência, o mais importante é a utilização de um sistema que não interrompa o fornecimento de energia durante a noite, pois, neste período, os serviços de apoio estarão fechados, além de que a hipótese de ocorrer um acidente se torna muito maior, podendo provocar sérios problemas. Por exemplo, caso o consumidor tenha um dispositivo médico de fornecimento de oxigénio que necessite de energia, de certo que daí adviriam consequências para o distribuidor, como processos judiciais.

Portugal não tem um fuso-horário igual em todas as regiões. Por exemplo, a Madeira, embora tenha o mesmo fuso horário do continente, devido à sua latitude, tem uma duração de luz solar inferior; no que diz respeito aos Açores, já se encontra na latitude semelhante ao continente e tem uma duração de luz solar semelhante, embora já esteja noutra longitude (diferente fuso horário com menos uma hora). Portanto, cada região tem um horário diferente quando o sol nasce e se põe.

Então, este sistema de corte de energia elétrica pode ser ajustado de duas formas. A primeira é uma diferenciação nos horários de não corte por região. A outra maneira, mais adequada, visto que não causaria tanta confusão, é estabelecer uma margem de segurança nos horários de não corte, de forma a que todas as regiões tenham energia elétrica em horários em que a luz solar não é suficiente. O horário adequado é das 19:00 às 7:00.

Um dos motivos para Portugal promover o uso do sistema pré-pago de energia elétrica é a possibilidade de otimizar a utilização do subsídio de energia dado pelo governo, denominado Tarifa Social de Energia. Atualmente, o subsídio é dado pelo programa Tarifa Social, com novas regras desde 1 julho de 2016, sendo este financiado de acordo com as regras de acesso da tabela 3.1, como condições de acesso [49].

Tabela 3.1: Condições de acesso aos descontos sociais em 1 julho 2016 [49].

<b>Domicílio Fiscal</b>	<b>Rendimento anual máximo para ser elegível</b>
1 Pessoa	5.808 €
2 Pessoas	8.712 €
3 Pessoas	11.616 €
4 Pessoas	14.520 €
5 Pessoas	17.424 €
6 Pessoas	20.328 €
7 Pessoas	23.232 €
8 Pessoas	26.136 €
9 Pessoas	29.040 €
10 ou mais Pessoas	31.944 €

Definidas as condições de acesso existentes atualmente, existem os descontos aplicados à potência contratada em Baixa Tensão até 6.9 kVA e ao consumo em kWh, no qual se faz uma comparação na tabela 3.2, sendo que estes custos dos descontos são suportados pelos produtores de energia elétrica. Não existe no entanto, qualquer tipo de limite no consumo de energia elétrica.

Tabela 3.2: Preços em 1 julho 2016 para Tarifa Social de venda a clientes finais ( $\leq 6,9$  kVA), [49] e Tarifa Normal [50].

Encargos de potência	kVA	€/mês	€/dia	Tarifa Normal €/dia
Simples, bi-horária e tri-horária	1,15	1,19	0,0390	0,1484
	2,3	1,76	0,0577	0,1926
	3,45	0,79	0,0258	0,2030
	4,6	0,89	0,0291	0,2600
	5,75	0,98	0,0321	0,3200
	6,9	1,07	0,0351	0,3846
Preço da energia ativa	Período horário	€/kWh*		Tarifa Normal €/dia
Simples ≤2,3 kVA		0,1115		0,1660
Simples >2,3 kVA		0,1342		
Bi-horária	Horas fora de vazio	0,1617		0,2067
	Horas de vazio	0,0710		0,1018
Tri-horária	Horas de ponta	0,1877		
	Horas de cheias	0,1424		
	Horas de vazio	0,0710		

\*RRC art.119º, nº5

Com este trabalho pretende-se elaborar uma proposta para a redução de consumo em que os valores de desconto da tabela 3.2 fossem variáveis, ou seja, quanto menor o consumo maior o desconto, sendo que a partir de determinado valor a estudar, não teria acesso a qualquer desconto. Quanto ao regime geral, o desconto de menor consumo manter-se-ia e acumularia com possíveis descontos de compra em avanço de mais do que um mês.

Relativamente ao tipo de medidor mais adequado para usar em Portugal, seria o contador inteligente, semelhante ao da figura 3.1, porque é simples de implementar nas infraestruturas já existentes, tendo em conta que usa a própria linha de alimentação como veículo de comunicação, tendo funcionalidades remotas como: leituras, alteração de regimes horários (simples, bi-horário, tri-horário), corte de energia remotamente, deteção de ilegalidades no que diz respeito à potência contratada, entre outros.

Como o distribuidor/fornecedor pode aceder remotamente, sugere-se que seja implementada uma plataforma *online* gratuita, que forneça informações úteis do ponto de vista do consumo, que consciencialize e ajude o consumidor, de algum modo, a reduzir o seu consumo, estando apenas disponível a quem aderir ao sistema pré-pago de energia.

No que diz respeito à pré-compra de energia, sugere-se que seja algo semelhante ao atualmente implementado no sistema pré-carregamento dos telefones móveis, que consiste numa entidade para pagamento e um identificador único, que pode ser, por exemplo, o número do contador, acrescido de um conjunto de códigos alfanuméricos, para evitar erros na introdução de créditos de energia. Ao optar-se por um sistema semelhante ao pré-carregamento de telefones móveis, utilizar-se-ia a rede de caixas multibanco como

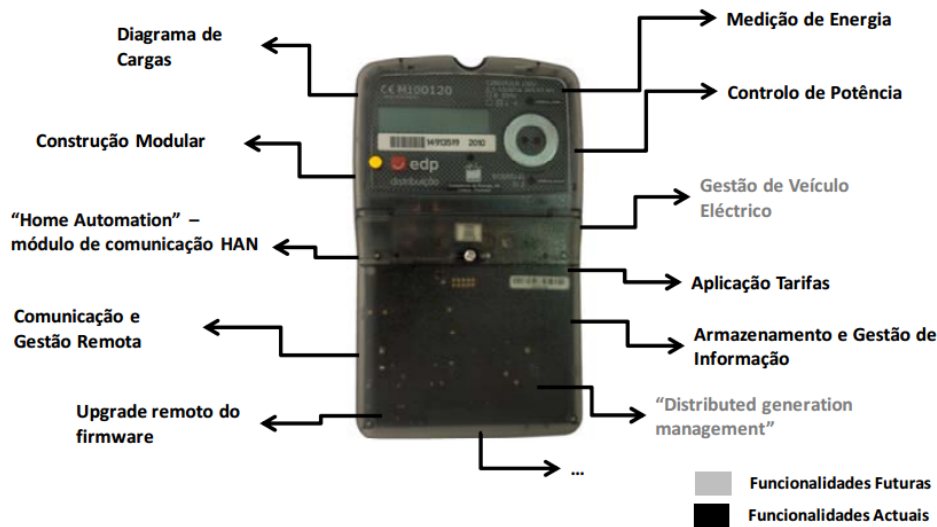


Figura 3.1: Contador semelhante ao utilizado no projeto-piloto *InovGrid* [10].

ponto de acesso ao carregamento, funcionando como alternativa a uma plataforma *online*, onde se poderiam fazer os carregamentos e permitir também a escolha de fornecedor de energia (a realizar num prazo máximo de 30 dias). Deste modo, haveria uma centralização da oferta no mercado de energia eléctrica, facilitando tanto fornecedores como consumidores.

Deve ainda a ERSE fazer uma monitorização atenta dos casos de corte de energia, afim de saber a quantidade de cortes de energia e qual a sua razão. Uma boa exigência seria obrigar o distribuidor a saber sempre os motivos do corte, para que se possa estudar e evitar que isso aconteça. Pode dar-se o caso de o consumidor estar com dificuldades em usar este tipo de sistema (provável nos primeiros tempos) ou que não esteja a conseguir utilizá-lo corretamente, ou porque se tenha apenas esquecido (pode ser evitado, enviando uma mensagem para o consumidor), ou mesmo porque não tenha dinheiro para fazer a recarga.

### 3.3 Arquitetura Proposta

Tendo por base a intenção de se aplicar um sistema de pré-compra de energia, providenciando uma previsão de consumo com base no histórico, é necessário fazer uma monitorização de consumo com possibilidade de ativar/desativar cargas. Posto isto e como a maioria das habitações tem presentemente Internet sem fios (*Wi-Fi*), optou-se por usar esta funcionalidade disponível.

A figura 3.2 demonstra a arquitetura utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, a qual se descreve a seguidamente.

Como se pretende com este trabalho uma prova de conceito, e devido à redução de custos, optou-se por colocar o "bloco" *DataBase* e Servidor a correr localmente num único computador.

Bloco Nó - este bloco é responsável por fazer medições de cargas, idealmente um equipamento. Para além disso, é também responsável pela permissão de ligar ou desligar, consoante as indicações do consumidor, tudo usando tecnologias sem fios. A limitação da quantidade de nós existente, depende da quantidade de endereços ip disponíveis por parte do *router* da habitação.

Do lado direito, têm-se os dispositivos de acesso à interface da plataforma *web*. Como ao fazer esta interface se teve em conta que poderia ser acedido por dispositivos com diferentes tamanhos de ecrã, este foi elaborado de modo a auto ajustar-se ao tamanho do ecrã, ou seja, é responsivo. Um dos requisitos para estes dispositivos é que se consigam ligar ao *router Wi-Fi*, bem como ter acesso a um *browser*.

Por fim, o bloco *router* é responsável por fazer uma interface entre o servidor, a base de dados, os dispositivos de acesso e cada um dos nós. Caso estes últimos não estejam presentes na mesma rede, pode fornecer também uma interface acessível do exterior.

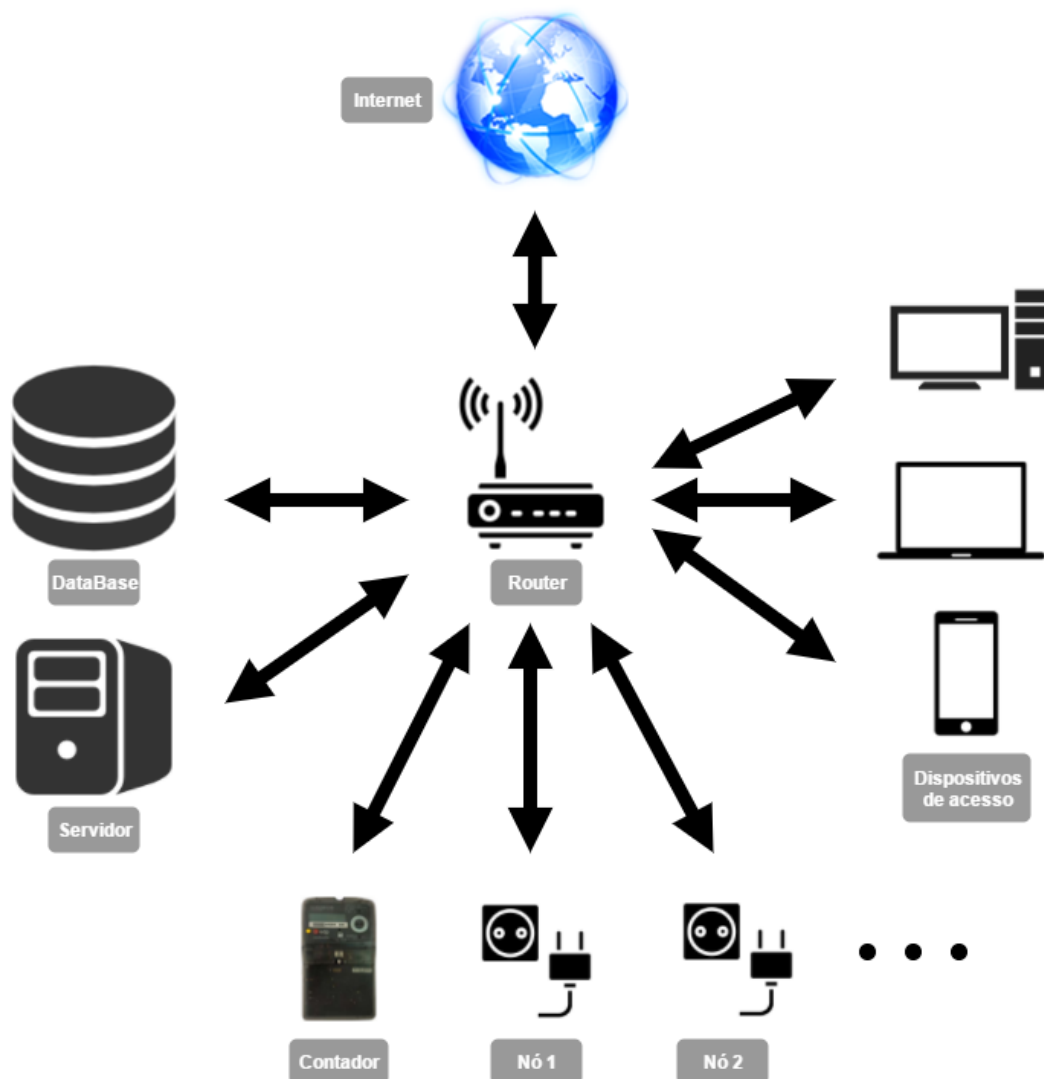


Figura 3.2: Arquitetura proposta do sistema SmartMeterOnline.

### 3.4 A Previsão de Consumo

Tendo como objetivo a previsão de consumo, os sistemas, podem ser classificados de acordo com o horizonte temporal, sendo normalmente divididos em três categorias [51]:

- **Longo prazo:** consiste na previsão com uma janela temporal superior a um ano, tornando-se importante numa perspetiva de futuro, permitindo às entidades responsáveis pela produção, bem como manutenção das linhas da rede elétrica, obterem dados sobre a necessidade de fazer investimentos.
- **Médio prazo:** consiste na previsão de uma janela temporal entre uma semana a um ano. Este tipo de previsão é utilizado para fazer agendamentos de intervenções técnicas de manutenção, bem como para negociações no mercado energético entre os agentes de mercado.
- **Curto prazo:** consiste na previsão de uma janela temporal entre uma hora a uma semana. Sendo importante para fazer agendamentos de operações de manutenção a curto prazo, para a programação de compra e venda de energia entre empresas.

Tendo em conta que este trabalho se foca na previsão do consumo de energia elétrica mensalmente, tendo por base o sector residencial em Portugal, esta enquadra-se num horizonte temporal de médio prazo, conforme descrito acima.

Muitas vezes, quando estamos a analisar cuidadosamente a série em causa, notamos que a mesma não se comporta sempre da mesma maneira, parecendo que o nível da série muda ou então que algum fator a influencia ou afeta num determinado instante de tempo. Quando existe a ocorrência deste fenómeno, dá-se o nome de intervenção. Este tipo de interrupção na série, por vezes, pode ser temporária ou então permanente, sendo um dos seus principais objetivos poder avaliar qual o seu verdadeiro impacto no comportamento da série em estudo,[51].

### 3.5 Seleção do Modelo de Previsão

Uma vez definidas as variáveis de entrada do modelo de previsão, segue-se a seleção do tipo de modelo a desenvolver. Devido à reduzida quantidade de amostras de consumo de energia elétrica e pretendendo usar de uma forma razoável a capacidade de processamento disponível, optou-se por descartar os modelos mais pesados computacionalmente, como as redes neuronais, abordados no capítulo 2, tentando não sacrificar em demasia a precisão do modelo.

### 3.5.1 Metodologia Box & Jenkins

Uma das técnicas quantitativas mais difundidas é a metodologia de Box & Jenkins, descrita por estes autores na década de 70. Os modelos de Box & Jenkins partem da ideia de que cada valor da série (temporal) pode ser explicada por valores prévios, a partir do uso da estrutura de correlação temporal que geralmente existe entre os valores da série. Os modelos Box & Jenkins segundo [52], têm sido largamente utilizados para modelar e fazer a previsão em aplicações médicas, ambientais, financeiras e de engenharia. Os próprios autores aplicaram essa metodologia para prever o consumo mensal de energia elétrica no leste da Arábia Saudita.

De acordo com [53], uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. As séries temporais são compostas por quatro elementos:

- **Tendência:** verifica o sentido de deslocamento da série ao longo de vários anos.
- **Ciclo:** movimento ondulatório que ao longo de vários anos tende a ser periódico.
- **Sazonalidade:** movimento ondulatório de curta duração, em geral inferior a um ano. Associada, na maioria dos casos, a mudanças climáticas.
- **Ruído aleatório ou erro:** compreende a variabilidade intrínseca dos dados e não pode ser modelado.

Como numa série temporal os dados são adquiridos de uma forma sequencial ao longo do tempo, espera-se que apresente correlação em série no tempo. Os modelos de Box-Jenkins, genericamente conhecidos por ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Averages*) e na literatura em português por Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel, são modelos matemáticos que visam captar o comportamento da correlação ou autocorrelação entre os valores da série temporal e com base nesse comportamento, realizar previsões futuras. Se essa estrutura de correlação for bem modelada, fornecerá boas previsões.

Segundo [54], os modelos ARIMA resultam da combinação de três componentes denominados "filtros": o componente auto-regressivo (AR), o filtro de integração (I) e a componente de média móvel (MA). Uma série pode ser modelada pelos três filtros ou apenas por um subconjunto deles, resultando nos vários modelos abordados a seguir.

#### Modelos Estacionários

Modelos estacionários são aqueles que assumem que o processo está em "equilíbrio". Um processo é considerado fracamente estacionário se a sua média e variância se mantêm constantes ao longo do tempo e a função de autocovariância depende apenas da defasagem entre os instantes de tempo. Um processo é fortemente estacionário se todos os momentos conjuntos são invariantes a translações no tempo.



### Modelo Auto-Regressivo (AR)

Num modelo auto-regressivo, a série de dados históricos  $Z_t$  é descrita pelos seus valores passados regredidos e pelo ruído aleatório  $\varepsilon_t$ . Assim, um modelo AR(p) é dado por:

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + \varepsilon_t \quad (3.1)$$

em que  $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$

$\phi_i$  é o parâmetro que descreve como  $\tilde{Z}_t$  se relaciona com o valor  $\tilde{Z}_{t-i}$  para  $i = 1, 2, \dots, p$ .

Para o modelo ser estacionário, é necessário que  $|\phi_i| < 1$  (condição de estacionariedade) e que as autocovariâncias ( $\gamma_k$ ) sejam independentes.

No caso do modelo AR(1), as autocovariâncias são dadas por:

$$\gamma_k = \phi_1^k \gamma_0 \quad (3.2)$$

e as autocorrelações  $\rho_k$  são dadas pela equação:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \phi_1^k \text{ com } k=0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

A função de autocorrelação decai exponencialmente quando  $\phi_1$  é positivo; quando  $\phi_1$  é negativo, a função de autocorrelação também decai exponencialmente, mas apresenta alternância de sinais positivos e negativos.

### Modelo de Média Móvel (MA)

Num modelo de médias móveis (do inglês *moving average*), a série  $Z_t$  resulta da combinação de ruídos brancos,  $\varepsilon$ , do período atual com aqueles ocorridos em períodos anteriores. Assim, um modelo de médias móveis de ordem q ou MA(q) é dado por:

$$\tilde{Z}_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.4)$$

em que  $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$

$\theta_i$  é o parâmetro que descreve como  $Z_t$  se relaciona com o valor  $\varepsilon_{t-i}$  para  $i = 1, 2, \dots, q$ .

As autocorrelações  $\rho_k$ , que nada mais são do que as autocovariâncias divididas pela variância, são dadas por:

$$\rho_k = \begin{cases} \frac{-\theta_k + \theta_1 \theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q}{1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2} & k = 1, 2, \dots, q \\ 0 & k > q \end{cases} \quad (3.5)$$

A função de autocorrelação do modelo MA(1) apresenta apenas a primeira autocorrelação não nula e as demais iguais a zero. A primeira autocorrelação será positiva se  $\phi_1$  for menor que zero e negativa se  $\phi_1$  for maior que zero. Segundo [55], uma propriedade importante da MA(1), proveniente da função de autocorrelação, é que a sua "memória"

é de somente um período. Uma dada observação, por exemplo  $Z_{53}$ , está correlacionada apenas ao seu antecessor  $Z_{52}$  e ao seu sucessor  $Z_{54}$ , mas não a qualquer outro membro da série.

### Modelos Não Estacionários

Quando uma série temporal apresenta média e variância dependentes do tempo, é porque esta não é estacionária. A não estacionariedade de uma série implica que:

- (a) Há inclinação nos dados e eles não permanecem em redor de uma linha horizontal ao longo do tempo e/ou
- (b) A variação dos dados não permanece essencialmente constante ao longo do tempo, isto é, as flutuações aumentam ou diminuem com o passar do tempo, indicando que a variância se vai alterando.

Para detetar a não estacionariedade de uma série, o comportamento temporal pode ser analisado graficamente, identificando padrões (a) e (b) ou então, aplicando os testes estatísticos de raiz unitária, de entre os quais se destaca o teste de raiz unitária mais usado, *Dickey-Fuller*.

#### 3.5.1.1 Modelo ARIMA

##### Modelo Auto-Regressivo Integrado de Média Móvel (ARIMA)

Como a maioria dos procedimentos de análise estatística de séries temporais pressupõe que estas sejam estacionárias, será então necessário transformá-las, caso ainda não sejam. Segundo [53], a transformação mais comum consiste em fazer diferenciações sucessivas da série original até obter uma série estacionária. A primeira diferenciação de  $Z_t$  é definida por:

$$\frac{dZ_t}{dt} = Z_t - Z_{t-1} \quad (3.6)$$

Em situações normais, ainda segundo os autores citados, será suficiente efetuar uma ou duas diferenciações para que a série se torne estacionária. O número  $d$ , de diferenciações necessárias para tornar a série estacionária, é denominado ordem de integração. A inclusão do termo de ordem de integração permite que sejam utilizados os modelos ARIMA( $p, d, q$ ) dados pela equação

$$\omega_t = \phi_1 \omega_{t-1} + \dots + \phi_p \omega_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.7)$$

em que  $\omega_t = \frac{d^d Z_t}{dt^d}$

A metodologia de **Box & Jenkins** consiste num processo com vista à obtenção de um modelo de previsão ARIMA, constituído por 5 etapas de avaliação [45] :

- Estabelecer a estacionaridade da série. Caso esta não seja estacionária, é necessário proceder a sucessivas diferenciações da mesma, até que se obtenha o pretendido.
- Identificar um modelo estacionário que se ajuste aos dados em estudo através de análise da série temporal, mais propriamente pelo comportamento das ACF e das PACF.
- Especificar o modelo e estimar os parâmetros do mesmo.
- Realizar testes de validação de forma a garantir que o modelo escolhido descreve os dados em estudo de forma adequada. Deve ser feita uma análise aos resíduos e, normalmente distribuído com média e variância constantes sendo que os resíduos não devem apresentar correlações entre eles.
- Após a verificação da adequabilidade do modelo, este estará pronto a ser utilizado para realizar a previsão.

Segundo a metodologia de Box-Jenkins, os modelos ARIMA descrevem tanto o comportamento estacionário, como o não estacionário. Dessa forma, pode-se afirmar que esta é uma metodologia de modelação flexível, em que as previsões com base nesses modelos são feitas a partir dos valores correntes e passados dessas séries.

### 3.5.1.2 Estacionaridade da Série Temporal

Os modelos ARIMA ou Box-Jenkins são excelentes modelos de previsão de curto prazo [56]. Resultados de análises com esses modelos mostram que os melhores resultados (previsões) são obtidos com dados de 5 a 10 anos de informação (mensal), em particular na presença de sazonalidade. Como já referido, a importância do processo observado ser estacionário é a possibilidade de fixar parâmetros do modelo válidos para previsão do futuro, a partir do passado. Assim, o primeiro passo para esta modelação, é a realização de procedimentos para a remoção da não estacionaridade. Algumas séries temporais apresentam sazonalidade, ou seja, demonstram flutuações periódicas. No caso de a série apresentar sazonalidade, esta deve ser tida em conta no futuro modelo. Esta sazonalidade pode ser observada nos gráficos de autocorrelação, sendo que deverá mostrar alta correlação nos *lags* iguais ao período desta sazonalidade.

Um processo diz-se estacionário quando o comportamento da série não se altera com o passar do tempo, tem a propriedade de que a sua média, variância e covariância não mudam no decorrer do tempo, ou quando a probabilidade de ocorrerem flutuações no processo em torno da média é a mesma em qualquer momento do processo.

Uma vez que muitas séries apresentam tendências, instabilidades e oscilações no tempo, podemos recorrer a transformações que estabilizam a média e/ou a variância da série, que deste modo convertem a série não estacionária em estacionária.

O estudo deste tipo de processos pode fazer-se no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No caso do domínio da frequência, será importante o uso do periodograma e da densidade espectral; já no caso do domínio do tempo, as funções de autocovariância 3.2 e autocorrelação 3.3, são as que se destacam mais nesta área [57].

Conforme descrito anteriormente, uma série pode ser considerada estacionária, se existir um decaimento abrupto ou rápido e não estacionária, se tiver um decaimento lento para zero. Na figura 3.3, encontram-se alguns exemplos de gráficos de autocorrelação de séries temporais:

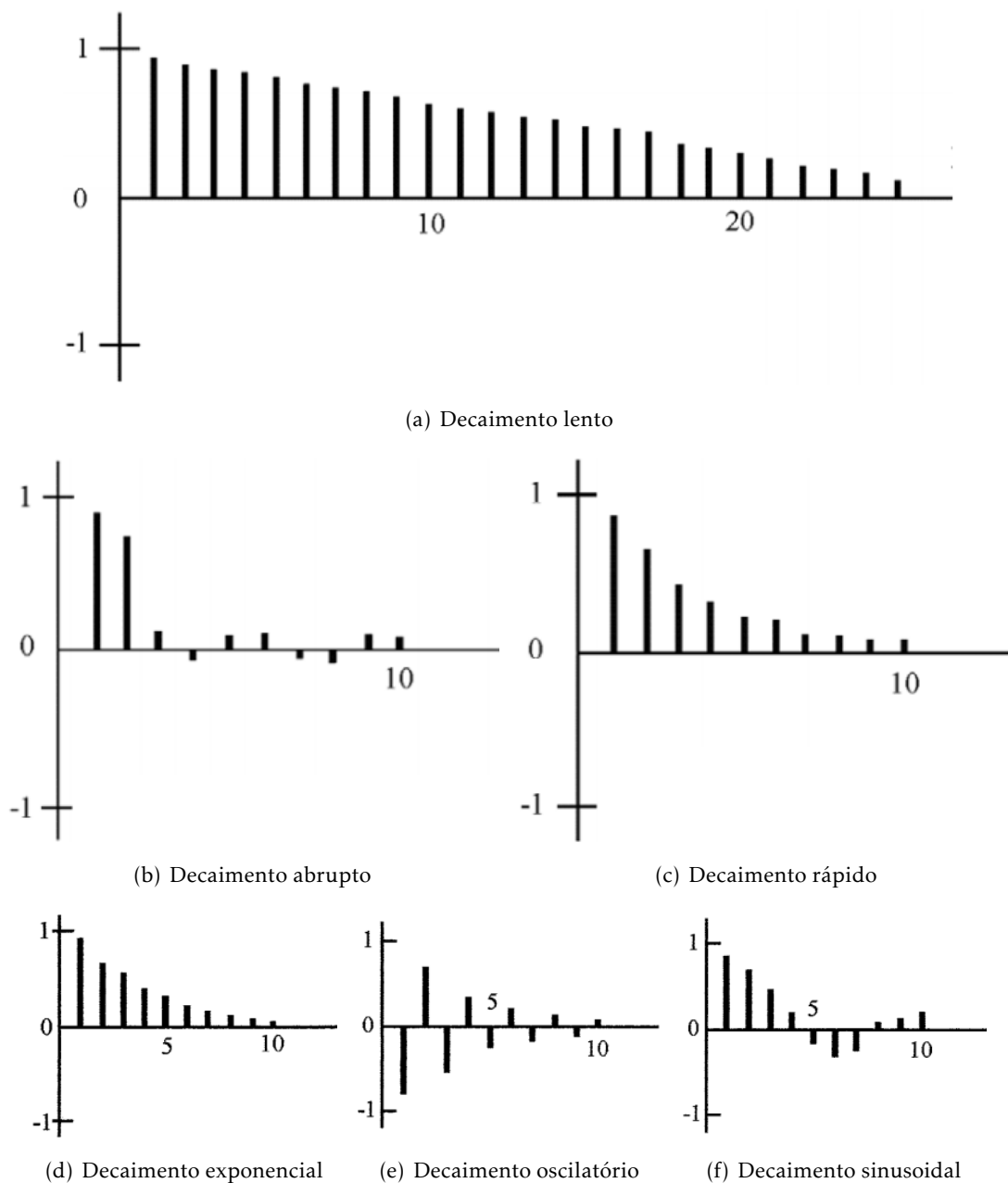


Figura 3.3: Caracterização do decaimento na série temporal.

**O Teste de verificação de estacionaridade, raiz unitária *Dickey-Fuller***

Seja o processo estocástico de raiz unitária,

$$Y_t = \rho Y_{t-1} + \varepsilon_t \text{ com } -1 \leq \rho \leq 1 \quad (3.8)$$

em que  $\varepsilon_t$  é um termo de erro de ruído branco.

Quando  $\rho = 1$  (raiz unitária), o processo gerador da série  $Y_t$  é aleatório e a série é não estacionária. Subtraindo-se  $Y_{t-1}$  dos dois lados da igualdade, escreve-se:

$$\Delta Y_{t-1} = \delta Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3.9)$$

em que  $\delta = \rho - 1$ .

Um procedimento de teste da raiz unitária pode ser aplicado à equação 3.9. Dessa forma, estimam-se os parâmetros da equação 3.9 e testa-se se  $\delta = 0$ . Se  $\delta = 0$  e  $\rho = 1$ , então existe raiz unitária e a série original é não estacionária.

**3.5.1.3 Estabelecimento dos Parâmetros do Modelo ARIMA**

As ordens de  $p$  (AR) e  $q$  (MA) podem ser determinadas respetivamente nos gráficos obtidos pela PACF (função de autocorrelação parcial) e pela ACF (função de autocorrelação total). Para isso, é preciso estar atento à forma de decréscimo da série e em que lag acontece o corte brusco. Este corte dá-se no lag cuja correlação é mais significativa, determinando assim a ordem do modelo.

O padrão teórico de um AR é um decréscimo exponencial na ACF e um corte brusco na PACF no lag correspondente à ordem do modelo. O padrão MA é um corte brusco na ACF e um decréscimo exponencial na PACF. No modelo ARMA, verifica-se a presença de um corte brusco tanto na ACF quanto na PACF.

Tabela 3.3: Comportamento teórico da ACF e PACF para alguns modelos

Modelo	ACF	PACF
MA(1)	1 pico no lag 1 ( $\rho_1 \neq 0$ )	Decrescimento exponencial
AR(1)	Decrescimento exponencial	1 pico no lag 1 ( $\phi_{11} \neq 0$ )
MA(2)	1 pico no lag 1 e 2 ( $\rho_1 \neq 0$ e $\rho_2 \neq 0$ )	Mistura de exponenciais ou ondas sinusoidais amortecidas
AR(2)	Mistura de exponenciais ou ondas sinusoidais amortecidas	1 pico no lag 1 e 2 ( $\phi_{11} \neq 0$ e $\phi_{22} \neq 0$ )
ARMA(1,1)	Decrescimento exponencial	Decrescimento exponencial

**Cr terio de Akaike e o estabelecimento da ordem dos parâmetros**

Uma outra maneira de verificar a adequabilidade de um modelo é usando o *Akaike Information Criterion* (AIC). O AIC é dado por:

$$AIC = T \ln(\hat{\sigma}_u^2) + 2p$$

Onde  $p$  é o número de parâmetros do modelo,  $T$  o tamanho da série.

O melhor modelo é aquele que apresenta menor AIC. Mas existe um problema, o AIC tende a superestimar o número de parâmetros no modelo. Assim, pode-se calcular o AIC corrigido:

$$AIC = T \ln(\hat{\sigma}_u^2) + T \frac{\left(\frac{1+p}{T}\right)}{1 - \left(\frac{p+2}{T}\right)} \quad (3.10)$$

**3.5.2 Média Móvel Simples**

Considerando a série temporal  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ , estacionária e localmente constante, composta pela adição de um ruído aleatório da seguinte forma,

$$Z_t = \mu_t + \varepsilon_t \text{ com } t = 1, \dots, N$$

onde  $E(\varepsilon_t) = 0$ ,  $Var(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2$  e  $\mu_t$  é um parâmetro desconhecido que varia com o tempo.

A técnica de média móvel simples consiste em calcular a média aritmética das observações mais recentes, ou seja,

$$M_t = \frac{Z_t + Z_{t-1} + \dots + Z_{t-k+1}}{k} = M_{t-1} = \frac{Z_t - Z_{t-k}}{k} \quad (3.11)$$

Sendo que  $k$  representa o comprimento da média.

Desta forma,  $M_t$  é uma estimativa do nível  $\mu_t$  que não leva em consideração as observações mais antigas. Há ainda a referir que, a cada período, a observação mais antiga é substituída pela mais recente, calculando-se uma média nova.

**3.5.3 Suavização Exponencial Simples**

O método de Suavização Exponencial Simples (SES - *Single Exponential Smoothing*) pega na previsão do período anterior e ajusta-o, através da atribuição de um peso, conforme se pode ver pela seguinte equação:

$$Z_{t+1} = Z_t + \alpha (Y_t - Z_t) \quad (3.12)$$

Onde  $Z_{t+1}$  é a previsão do período  $t+1$  que queremos calcular,  $Y_t$  é o valor real atual da observação,  $Z_t$  é a previsão anterior, feita para o mesmo período de  $Y_t$ , e a sua subtração ( $Y_t - Z_t$ ) fornece-nos o erro da previsão. O valor de  $\alpha$  é conhecido por parâmetro de suavização e está limitado a valores entre 0 e 1, [58].

Pode-se constatar que a nova previsão é somente a velha previsão com um ajustamento do erro que ocorreu na última previsão. Sabemos que, para valores de  $\alpha$  reduzidos (próximos de 0), o ajustamento do erro é muito pequeno e os pesos dos dados são quase uniformes, tornando a previsão mais insensível e muito próxima da média de todos os valores. Se os valores de  $\alpha$  forem muito próximos de 1, os pesos decrescem muito rapidamente, implicando que apenas as observações mais recentes tenham influência efetiva no resultado da previsão.

Outra forma de escrever a equação 3.12 é [58]:

$$Z_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) Z_t \quad (3.13)$$

Nesta equação, podemos constatar que  $Z_{t+1}$  baseia-se no peso  $\alpha$  dado a  $Y_t$  (a observação mais recente) e no peso  $(1 - \alpha)$  dado a  $Z_t$  (previsão mais recente).

A equação 3.13 é a forma mais usada nos métodos de suavização exponencial e tem a vantagem de não ser necessário armazenar os valores das observações anteriores. Os valores que precisam de ser armazenados são a observação mais recente, a previsão mais recente e o valor de  $\alpha$ , [58].

Ao aplicar sucessivamente a expressão 3.13 para estimar os níveis de instantes progressivamente mais antigos, obtém-se:

$$Z_{t+1} = \alpha Y_t + \alpha (1 - \alpha) Y_{t-1} + \alpha (1 - \alpha)^2 Y_{t-2} + \dots + \alpha (1 - \alpha)^n Y_{t-n} \quad (3.14)$$

Concluindo que  $Z_{t+1}$  representa a média móvel ponderada de todas as observações passadas.

#### 3.5.4 Métodos de Cálculo da Exatidão do Modelo de Previsão

Na prática, haverá sempre um erro de previsão e a dimensão desse erro demonstra a exatidão do mesmo. Os modelos de previsão baseiam-se numa parte sistemática (que é modelada) e uma parte estocástica (à qual não se tem acesso, pois é indeterminada), ou seja, considerando-se  $f(x)$  como a parte sistemática e  $\varepsilon$  como o erro, tem-se:  $P = f(x) + \varepsilon$ . Para estimar a variabilidade na previsão, pode ser usado um indicador chamado Razão de previsão (Rp), que é definido como a razão entre o real e a previsão, ou seja,

$$Rp = \frac{\text{Consumo Real}}{\text{Previsão de Consumo}}$$

Assim,  $Rp$  menor que um indica que o consumo real esteve abaixo da previsão e  $Rp$  maior que um indica consumo acima do previsto.

A exatidão de um modelo de previsão pode ser medida a partir do cálculo de alguns erros, dentre os quais se podem citar:

- Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Squared Error* (RMSE)):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|^2} \quad (3.15)$$

- Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* (MAE)):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (3.16)$$

- Erro Médio Absoluto Percentual (*Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| 100 \quad (3.17)$$

- Erro Médio (*Mean Error* (ME)):

$$ME = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i) \quad (3.18)$$

- Erro Médio Percentual (*Mean Percentage Error* (MPE)):

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right) 100 \quad (3.19)$$

Onde  $x_i$  é o valor observado no instante  $i$  e  $\hat{x}_i$  é o valor previsto no instante  $i$  e  $n$  o número de amostras.

## 3.6 Tecnologias de Comunicação

As tecnologias com e sem fio têm vindo a ser utilizadas para aplicação em habitações. Nas tecnologias com fio, a *Ethernet* e a *Power Line Communication* (PLC) têm sido consideradas devido à sua ampla aceitação, enquanto o *Wi-Fi*, *ZigBee*, *Z-Wave* e *Bluetooth* foram selecionadas como tecnologias candidatas a um ambiente sem fios.

### 3.6.1 Protocolos de Comunicação com Fios

No que diz respeito às soluções com fio, o estudo será centralizado em tecnologias como a *Ethernet* e PLC.

#### 3.6.1.1 *Ethernet*

As *Local Area Network* (LAN) com fio usam *Ethernet* e adaptadores de rede. Estes, geralmente, também exigem dispositivos centrais, como *hubs*, *switches* ou roteadores para acomodar os nós de ligação.

No que diz respeito à instalação, a solução é pouco prática, uma vez que necessita de cabos ou ligação física entre cada nó da rede ou a um dispositivo central. No que diz respeito a custos, como cabos, *hubs* e *switches*, estes são baratos, sendo as soluções com fio são vantajosas. O principal benefício que pode ser referido é a maior fiabilidade de tais



soluções no transporte de dados, para além de oferecer também um desempenho superior [59].

A *Ethernet* é uma tecnologia de área local, com as redes a operarem tradicionalmente dentro de uma determinada casa ou edifício, com a ligação a dispositivos fisicamente próximos. No máximo, os dispositivos *Ethernet* podem ter 90 metros de cabo entre eles e o equipamento ativo no meio, tornando-se impraticável para conectar a locais geograficamente dispersos. Os avanços modernos têm aumentado consideravelmente estas distâncias, permitindo que as redes *Ethernet* possam abranger centenas de metros. É hoje a tecnologia de rede mais amplamente implantada no mundo, tendo evoluído de acordo com a maturação da rede de computadores, a fim de abranger novas tecnologias [59].

Originalmente, o protocolo *Ethernet* (802.3) consiste na comunicação através de um único cabo partilhado por todos os dispositivos na rede, permitindo assim a comunicação entre todos eles. Em relação ao protocolo *Ethernet*, este especifica um conjunto de regras para construir os pacotes enviados através da rede, como um comprimento mínimo e máximo deste pacote, bem como a inclusão de endereços de destino e origem [59].

Sempre que um dispositivo envia uma mensagem, todos os dispositivos conectados na mesma rede recebem e examinam o pacote, verificam o endereço de destino e só de seguida é que vai examinar o seu conteúdo, no caso de o pacote ser para si. A *Ethernet* também oferece a possibilidade de enviar uma mensagem por *broadcast*, transmitindo assim um pacote para todos os nós da rede que, por sua vez, vão receber e processar a mensagem. Apesar das mudanças significativas na *Ethernet*, os formatos dos pacotes têm sido mantidos, de modo a que diferentes gerações de *Ethernet* possam ser facilmente interligadas, mantendo a retro-compatibilidade [59].

Algumas limitações da tecnologia *Ethernet* estão listadas abaixo:

- Comprimento do cabo compartilhado: há limites práticos para o tamanho da rede *Ethernet*.
- Enfraquecimento do sinal ao longo do comprimento do cabo.
- Interferência elétrica no sinal a partir de dispositivos vizinhos.
- O tempo de espera antes de enviar pacotes.

Como a *Ethernet* é uma tecnologia com fio e devido às limitações apresentadas, não é a melhor solução para aplicar na rede doméstica, uma vez que pode comprometer o desempenho do sistema, na medida em que nem todas as habitações têm esta rede implementada, o que acarretaria mais custos de instalação.

#### 3.6.1.2 PLC

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) definiu o padrão para PLC, o IEEE P1901-2010, como um *standard* para *Broadband over Network Power Line: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*. A tecnologia PLC é capaz de transportar dados

através da rede de alimentação elétrica, o que significa que o meio físico utilizado para a transmissão de dados é o mesmo condutor utilizado para a transmissão de energia elétrica. O PLC permite, assim, estender uma rede de área local existente, através das tomadas elétricas, apenas exigindo para o efeito a instalação de unidades específicas. Estas unidades incluem um transmissor capaz de gerar sinais de portadora de rádio frequência modulado e, assim, adicionar o sinal de comunicação com o sinal de linha de alimentação de *Alternate Current* (AC). Do outro lado, é necessária uma unidade recetora capaz de separar o sinal de comunicação a partir dos sinais de componentes de alimentação de AC [59].

O princípio do protocolo PLC consiste na transmissão de um sinal de comunicação rádio frequência de algumas centenas de Hz a algumas dezenas Mega Hertz (MHz), juntamente com a energia alterna, tendo frequências de 50 a 60 Hz. Este sinal é transmitido através da infraestrutura de alimentação e pode então ser recebido e decodificado remotamente. Qualquer dispositivo PLC localizado na mesma rede, pode receber o sinal.

Hoje em dia, há um interesse particular em PLC para a indústria de leitura automática de contadores, porque permite obter dados atualizados de todos os pontos medidos, a fim de melhorar o controlo e operar o sistema. Por exemplo, a tecnologia pode ser usada por empresas de energia elétrica para fornecer informações a uma estação central, em que comunicam através de sinais de comando para dispositivos localizados nas habitações dos consumidores de energia elétrica.

Apesar de ser uma solução com fios, a tecnologia PLC é mais atraente do que os referidos sistemas de comunicação *hard-wired*, que exigem cabos de comunicação dedicados. Com PLC, o meio de transmissão já existe, reduzindo assim a complexidade de instalação e os custos.

Por outro lado, a tecnologia PLC apresenta a desvantagem de as linhas de distribuição e comunicação serem as mesmas, estando suscetíveis a ruídos elétricos e interferências, como picos e ruído, existindo assim também a necessidade de evitar a introdução de interferência de Rádio Frequência (RF) nas linhas. Especificamente, o equipamento ligado à linha de alimentação interna, pode gerar ruído ou reduzir a impedância da linha de alimentação, o que pode resultar num aumento da taxa de erro para provocar falhas de comunicação na linha de alimentação e comunicação. Além disso, as linhas de energia elétrica atenuam os sinais de RF significativamente e não são projetados para suportarem a transferência eficiente de sinais de frequência mais elevada [59].

Os principais cenários de falha são devidos a [59]:

- Interferência de sistemas próximos, dando lugar a muitos sinais na mesma largura de banda.
- Atenuação do sinal por meio de dispositivos ativos, tais como relés, transístores e retificadores, que criam ruído no seu próprio sistema.

- Atenuação do sinal por dispositivos passivos: transformadores e conversores DC-DC atenuam o sinal de frequência de entrada quase completamente.

### 3.6.2 Protocolos de Comunicação sem Fios

Nesta secção serem abordadas arquiteturas usadas em protocolos de comunicação sem fios, bem como algumas tecnologias, nomeadamente, *ZigBee*, *Bluetooth*, *Z-Wave*, e *Wi-Fi*.

#### 3.6.2.1 *ZigBee*

O *ZigBee* (IEEE 802.15.4) é um protocolo de comunicação de dados com uma baixa taxa de transmissão, com baixo consumo energético e tecnologia de baixo custo para *Wireless Personal Area Network* (WPAN). Tem como propósito ser mais simples e menos dispendioso, quando comparado a outras WPAN [59]:

- Como o *ZigBee* pode ser ativado (ir de modo *sleep* para o modo ativo) em 15ms ou menos, a latência pode ser muito baixa e os dispositivos podem ser muito reativos. Como pode estar no modo *sleep* a maior parte do tempo, o consumo médio de energia pode ser reduzido radicalmente, aumentando assim a vida útil da bateria.
- Em geral, o protocolo *ZigBee* permite minimizar o tempo que o *transceiver* está ligado, reduzindo assim o consumo de energia. Em redes baseadas em *beacon*, os nós só necessitam de estar ativos enquanto o *beacon* está a ser transmitido.

As especificações do *ZigBee* foram desenvolvidas pela *ZigBee Alliance*, que é uma associação de empresas que trabalha em conjunto no desenvolvimento de um protocolo para permitir que exista comunicação de baixa potência, rentável e confiável, baseada numa rede sem fios, com monitorização e controlo de produtos, tendo por base a criação de um padrão global e aberto [60]. A *ZigBee Alliance* é responsável pelo padrão da rede e da camada de aplicação, a fim de fornecer uma rede interoperável de dados, serviços de segurança e uma gama de soluções sem fios para controlo de habitações domésticas. O *ZigBee* suporta três diferentes topologias de rede [60]:

- **Estrela:** estabelece a comunicação entre dispositivos e um único controlador central, chamado o coordenador *Personal Area Network* (PAN). O coordenador PAN deve ser alimentado por meio de uma tomada, enquanto que os dispositivos poderão ser alimentados por bateria. As aplicações que beneficiam deste tipo de topologia, incluem a automação doméstica de periféricos, brinquedos e jogos. Depois de um dispositivo principal ser ativado pela primeira vez, pode criar a sua própria rede e tornar-se o coordenador PAN. Em cada iniciação, a rede escolhe um identificador de PAN que não esteja a ser usado atualmente por qualquer outra rede, dentro da esfera de rádio de influência. Isso permite que cada rede em estrela possa operar de forma independente.

- **Mesh:** também tem um coordenador PAN e em contraste com a topologia em estrela, qualquer dispositivo pode comunicar com qualquer outro dispositivo, enquanto estiverem no raio de alcance um do outro. Tem aplicações como, controlo industrial e monitorização, redes de sensores sem fio, controlo de stock com *tracking*. Ele permite também usar vários *hops* (saltos) para encaminhar mensagens de um dispositivo para qualquer outro, dentro na rede. Ele pode fornecer confiabilidade pelo roteamento multicaminho. O lado negativo desta arquitetura são os consumos de energia dos nós individuais serem maiores do que os de topologia em estrela, bem como o tempo que a mensagem leva a ir de um nó para o destino final também poder ser bastante elevado.
- **Cluster-Tree:** é um caso especial de uma rede *mesh* que, funciona como uma hierarquia em que o nó acima desempenha a função de dispositivo principal ou *full-function*. A maioria dos dispositivos são *full-function* e *reduced-function*. Qualquer dispositivo *full-function* pode agir como coordenador e fornecer serviços de sincronização com outros dispositivos e coordenadores.

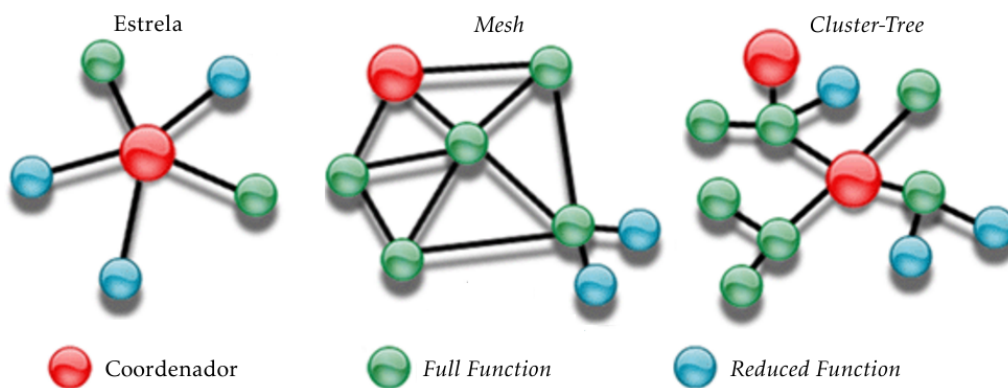


Figura 3.4: Topologia de rede em Estrela, Mesh e Cluster-tree, [61].

### 3.6.2.2 Bluetooth

O *Bluetooth* foi previamente regulado pelo padrão IEEE 802.15.1, mas este padrão foi abandonado. Em vez disso, o *Bluetooth* é gerido pelo *Bluetooth Special Interest Group*, que adotou *Bluetooth Core Specification* versão 4.0 em 2010. Este protocolo é projetado para curto alcance e comunicações de alta taxa de dados, permitindo até 25 Mega bit por segundo (Mbps) num raio de até 60 metros, em campo aberto [62].

A versão mais recente do protocolo trouxe-nos a tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE), proporcionando capacidades de transmissão de baixa potência. Assim, os dispositivos que utilizam a tecnologia BLE são capazes de operar vários meses com uma única bateria de reduzido volume. Baterias do tipo moeda, são agora possíveis. Assim, BLE é um protocolo adequado para redes de sensores.

O BLE opera na mesma frequência que o *Wi-Fi* 2,4 Giga Hertz (GHz), tal como o *Bluetooth* clássico (802.15.1), mas tem algumas diferenças funcionais. Em vez de usar um canal de 1 MHz, BLE usa canais de 2 MHz, tendo como efeitos práticos um consumo reduzido de energia, menor taxa de dados (até 1 Mbps) e maior raio de alcance (até cerca de 60 metros, na versão 5.0 permite até 50 Mbps e um raio de alcance até 245 metros [62]).





### 3.6.2.3 Z-Wave

*Z-Wave* foi desenvolvido pela *Zensys* e é mantido pela *Z-Wave Alliance*. Quando comparado com o padrão IEEE 802.15.4 (*ZigBee*), o *Z-Wave* tem a vantagem de operar abaixo de 1 GHz (em torno de 900 MHz), não sendo afetado por interferências da popular banda de 2,4 GHz usada pelo *Wi-Fi* e *Bluetooth*. Na Europa, devido aos regulamentos comunitários, *Z-Wave* opera na frequência de 868 MHz. Quanto à topologia de rede, o protocolo *Z-Wave* suporta estrela e *mesh* com taxas de dados de 9,6 kilo bit por segundo (kbps) e 40 kbps.

### 3.6.2.4 Wi-Fi

Uma rede local sem fio, *Wireless Local Area Network* (WLAN), com base no padrão *Wi-Fi* IEEE 802.11 é um sistema de comunicação de dados flexível, implementado como uma extensão ou como uma alternativa para uma LAN com fios, dentro de um edifício ou campus. Usando ondas eletromagnéticas, WLANs transmitem e recebem dados pelo ar, minimizando a necessidade de conexões com fio. Assim, WLANs combinam conectividade de dados com mobilidade do utilizador e permitem LANs móveis, graças a uma configuração simplificada. Tem também um raio de alcance elevado, que vai dos 100 metros a 30 quilómetros.

Tabela 3.4: Tabela comparativa dos protocolos sem fios analisados

	 ZigBee®	 Bluetooth®	 Z-WAVE	 Wi-Fi™
<b>Distância</b>	10 m	10 - 60 m	30 m	30 - 100 m
<b>Consumo máximo</b>	40 mA	12.5 mA	2.5 mA	120 mA
<b>Velocidade de comunicação</b>	0.04 - 0.25 Mbps	0.7 - 2.1 Mbps	0.1 Mbps	1 - 1300 Mbps
<b>Frequência de funcionamento</b>	868 MHz (Europa) ou 2.4 GHz	2.4 - 2.5 GHz	908.42 MHz	2.5 GHz; 5 GHz
<b>Responsáveis pelo desenvolvimento</b>	<i>ZigBee Alliance</i>	<i>Special Interest Group (SIG)</i>	<i>Z-Wave Alliance</i>	<i>Wi-Fi Alliance</i>

Comparando com as anteriores, o *Bluetooth* fornece uma elevada taxa de transmissão, mas com curto alcance, enquanto que *Z-Wave* e *ZigBee* providenciam alcance razoável, mas baixa transmissão de dados, sendo que, como o *Bluetooth* e *Wi-Fi* trabalham na mesma gama de frequência, ficam assim mais suscetíveis a ruído e consequente perda de pacotes.

## 3.7 *Hardware Principal*

### 3.7.1 *Arduino*

Arduino é uma plataforma para fazer protótipos de código aberto, baseado em *software* e *hardware* flexível, fácil de usar. É constituído por dois blocos, um de microcontroladores físicos e outro de *software Integrated Development Environment* (IDE). A plataforma Arduino tornou-se bastante popular na comunidade, principalmente devido à sua simplicidade e acessibilidade: nenhum *hardware* adicional é necessário para programar a maioria das *Boards* (placas Arduino principais), para além de usar um cabo *Universal Serial Bus* (USB), existem placas oficiais de expansão denominadas *shield*, prontas a usar estando disponíveis a partir de 16,00 €.

#### 3.7.1.1 *Boards*

Na presente data, há um total de 12 *Boards* diferentes, disponíveis para compra na loja oficial, cada uma delas servindo diferentes finalidades e aplicações. As placas de expansão, *shields*, Arduino, prontas a usar, são formadas basicamente por um microcontrolador e alguns componentes eletrónicos adicionais, tais como regulador de tensão ou uma interface série USB e alguns *headers* (conectores), para ligar diretamente a fios *jumper*.

#### **Microcontrolador**

O Arduino usou microcontroladores públicos (AVR) na maioria das suas *boards* até á pouco tempo. Atualmente, estão a introduzir microcontroladores como ARM (Arduino DUE, ZERO), *Intel Currie* (Arduino 101) e *Cortex* (Arduino MKR1000), sem nenhuma modificação em termos do próprio microcontrolador. A única coisa que diferencia microcontroladores Arduino é o carregador de inicialização personalizado, que é especialmente concebido para permitir que os microcontroladores sejam programados através do IDE Arduino. Focando nas *boards* AVR, sendo as mais acessíveis e disponíveis no mercado aquando da iniciação deste trabalho, não deixando de fora a mais recente (Arduino 101), os seguintes microcontroladores podem ser encontrados:

- *ATmega328P*, é um microcontrolador de 8 bits com 32KB de memória Flash e 2 kB de *Random Access Memory* (RAM) e suporta frequências até 20 MHz. Contém tudo o que é necessário para apoiar o microcontrolador, [63].
- *ATmega2560* é um microcontrolador AVR da *Atmel* de 8 bits de frequência 16 MHz, com 54 pinos digitais de entrada / saída (dos quais 15 podem ser usados como saídas *Pulse Width Modulation* (PWM)), 16 entradas analógicas, 4 *Universal asynchronous receiver/transmitter* (UART) (portas série de *hardware*), [64].

- *ATmega32U4* é um microcontrolador similar ao *ATmega328P*, com a grande diferença de que o *ATmega32U4* tem integrado no microcontrolador uma interface USB *transceiver*, [65].
- *Curie* é um processador com dois microcontroladores integrados, um x86(*Quark*) e ARC de arquitetura 32 bits, ambos a funcionar a uma frequência de 32 MHz, bem como um chip *Bluetooth* de baixa energia, um acelerómetro/giroscópio de 6 eixos, [66].

Tabela 3.5: Comparação entre microcontroladores Atmel no Arduino, [67]

<i>Board</i>	<b>Micro</b>	<b>Uno</b>	<b>Mega</b>	<b>101</b>
<b>Microcontrolador</b>	<i>ATmega32U4</i>	<i>ATmega328P</i>	<i>ATmega2560</i>	<i>Intel Curie</i>
<b>Tensão de Funcionamento/Entrada</b>	5V / 7-12V	5V / 7-12V	5V / 7-12V	3.3V / 7-12V
<b>Velocidade CPU</b>	16 MHz	16 MHz	16 MHz	32 MHz
<b>Entradas/saídas Analógicas</b>	12 / 0	6 / 0	16 / 0	6 / 0
<b>Entradas/saídas Digitais</b>	20 / 7	14 / 6	54 / 15	14 / 4
<b>EEPROM [kB]</b>	1	1	4	-
<b>SDRAM [kB]</b>	2.5	2	8	24
<b>Flash [kB]</b>	32	32	256	196
<b>USB</b>	Micro	Regular	Regular	Regular
<b>UART</b>	1	1	4	-
<b>Preço</b>	22.14 €	23.75 €	33.80 €	35.65 €

### 3.7.1.2 IDE Arduino

O IDE Arduino é o *software* usado para gravar e carregar programas para as *boards* Arduino ou microcontroladores compatíveis com *bootloader* Arduino. É um projeto em código aberto, compatível com todos os principais sistemas operativos: *Windows*, *Linux* e *Mac OS X*.

Este IDE Arduino usa a "linguagem de programação Arduino", que é baseado na ligação. Embora possa parecer estranho implementar a sua própria linguagem de programação para escrever *software* para microcontroladores AVR, não é o caso. O IDE Arduino apenas oferece uma saída da interface própria para a linguagem usada para programar microcontroladores genéricos em C e C++.

Com muitas funções próprias disponíveis, torna o processo de um escrever o nosso próprio programa mais fácil. Por outro lado, todas as características e vantagens de linguagens C e C++ também estão disponíveis: é possível fazer o *upload* de um programa escrito exclusivamente em C ou C++ para um Arduino, ou combinar ambos.

Uma das desvantagens do IDE é que ele carece de algumas das funcionalidades avançadas de outros IDEs comerciais, tais como uma ferramenta de depuração dedicada.

### 3.7.1.3 Sucesso do Arduino

A plataforma Arduino é um ótimo produto que só poderia ter uma explicação para a sua popularidade e aceitação dentro da comunidade de fabricantes de protótipos e/ou entusiastas. No entanto, o Arduino oferece algumas outras características únicas:

#### Acessível

As *boards* oficiais têm preços a partir de 24,00€. Este valor, embora baixo, ainda é alto, quando comparado com os microcontroladores, cujos preços rondam um par de euros. Mas, como o Arduino é uma plataforma de *hardware* de código aberto, é possível replicar o *hardware*, o que leva muitos distribuidores a venderem *boards* Arduino com outro nome, prontas a usar e muito baratas. Além disso, é possível comprar microcontroladores individuais e programá-los com carregador de inicialização (*bootloader*) Arduino e, facilmente construir as próprias *boards*.

#### Multiplataforma

Como dito anteriormente, o IDE Arduino está disponível para *download* para os principais sistemas operativos. Não é comum para microcontroladores a existência de IDEs que suportem *Mac OS X* e *Linux*, uma vez que, geralmente, estão disponíveis exclusivamente para o *Windows*.

#### Bibliotecas

O Arduino tem um grande repositório de bibliotecas disponíveis, a maioria delas escritas e partilhadas por e para a comunidade em código aberto. Isto transforma o processo de lidar com *hardware* comum mais simples e atingir objetivos mais facilmente, uma vez que é possível usar uma biblioteca que alguém criou para implementar o que queremos fazer.

#### Desempenho

Não há desvantagens em termos de desempenho para a programação de microcontroladores Arduino compatíveis, devido ao IDE dedicado em conjunto com linguagem eficiente C ou C++. O código é compilado antes de ser carregado e, em seguida, é executado diretamente no *chip*.



## Sensores

As *boards* Arduino são compatíveis com quase todos os sensores no mercado: as suas entradas analógicas tornam o Arduino capaz de ler dados a partir de sensores analógicos. As interfaces de comunicação, como *Inter-Integrated Circuit* (I2C) e *Serial Peripheral Interface* (SPI), tornam-no compatível com sensores digitais. Para além da compatibilidade de *hardware*, se acontecer estar a lidar com um sensor ou dispositivo popular, existe a probabilidade forte de alguém já o ter usado e existir uma biblioteca para interagir facilmente com o mesmo.

## Código aberto

Além da vantagem de custo, sendo o Arduino uma plataforma de *hardware* livre, torna-se disponível para ser usado por todos, mesmo para as empresas em produtos comerciais. Além disso, o desenvolvimento do projeto não é dependente de qualquer empresa, o que significa que não há nenhum risco de ser interrompido pelo facto de o *software* ter sido descontinuado. Além disso, se queremos uma característica diferente, podemos sempre adicioná-la nós mesmos, a partir de uma base sólida.

## Shields

Se todas as *boards* oficiais disponíveis não são suficientes para um projeto, existe a possibilidade de adicionar *shields* (placas de expansão) ao Arduino. Existem *shields* para adicionar *Ethernet*, *Wi-Fi*, para ajudar a lidar com relés, por exemplo. Se algo exige mais do que a *board* Arduino pode oferecer em termos de *hardware*, talvez isso possa ser feito recorrendo a um *shield*.

## 3.8 Hardware Complementar/Periférico

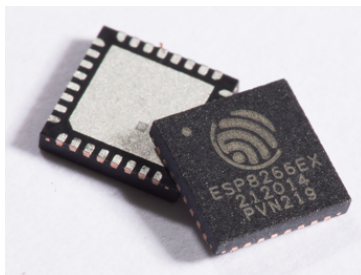
Para além do Arduino, existem outros produtos capazes de interagir com a *board* Arduino, com vista à elaboração de um protótipo capaz de apresentar uma solução associada à Internet das Coisas (IoT).

### 3.8.1 ESP8266

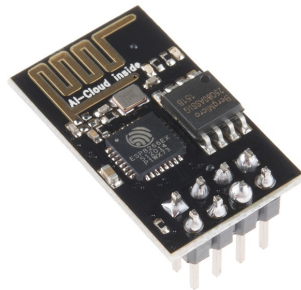
O ESP8266 é um módulo *Wi-Fi* barato, capaz de atuar no modo autónomo ou ligado a um microcontrolador. Existem 12 versões destes módulos em que a versão 1 é a mais simples e a 12 a mais completa, tendo os seguintes recursos [68]:

- 802.11 b/g/n *Wi-Fi*.
- Microcontrolador *MCU* de 32 bits de baixa energia.

- Conversor *ADC* de 10 bits integrado.
- Controlo Remoto *IR*, *GPIO*, *UART*.
- Pilha de protocolo *TCP/IP* integrada.
- Suporte variado de antenas.
- Suporte *Wi-Fi* 2.4GHz *WPA/WPA2*.
- Consumos ultra baixos, *deep sleep*  $< 10\mu\text{A}$  e corrente de fuga  $< 5\mu\text{A}$ .
- Tempo de *wake up* e transmissão  $< 2\text{ ms}$ .
- Consumo em *standby*  $< 1\text{ mW}$ .
- 20dBm potência de saída em modo 802.11 b.
- Temperatura de funcionamento entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $125^{\circ}\text{C}$ .
- Certificações *FCC*, *CE*, *TELEC*, *Wi-Fi Alliance*, *SRRC*.



(a) Microprocessador ESP8266EX da Espressif [68].



(b) Versão mais simples e pequena, ESP8266-01.



(c) Versão mais completa, ESP8266-12.

Figura 3.5: Implementações do microprocessador ESP8266EX por parte do fabricante AI-Thinker.

Desde que foi introduzido, em 2014, chamou a atenção da comunidade, porque representa uma alternativa fácil, simples e de baixo custo, para adicionar *Wi-Fi* a qualquer microcontrolador, uma vez que estes módulos podem ser comprados por preços entre 1.85 e 7€.

Quando comparado com os outros produtos concorrentes, ESP8266 tem a desvantagem de não ter qualquer grande empresa que suporte o produto. Além disso, a documentação oficial é escassa, dificultando a interação com o módulo. Por outro lado, tem uma comunidade ativa em crescimento, tendo inclusive desenvolvido uma biblioteca compatível com o IDE Arduino, especificamente concebida para interagir com ESP8266, [69].

### 3.8.2 Sensor de Corrente

O sensor ilustrado na figura 3.6 faz parte de um conjunto de sensores conhecidos como transformadores de corrente, os quais são usados para medição de corrente alternada (AC).

São especialmente muito úteis para medir o consumo de energia. Este sensor tem o núcleo ferromagnético dividido, não obriga a interromper o circuito que se está a medir para se proceder à instalação, sendo dos mais indicados pela sua capacidade de mobilidade, porque não precisa de ser feita nenhuma intervenção técnica com fios descarnados ou expostos. Por isso, é denominado como sensor não invasivo.

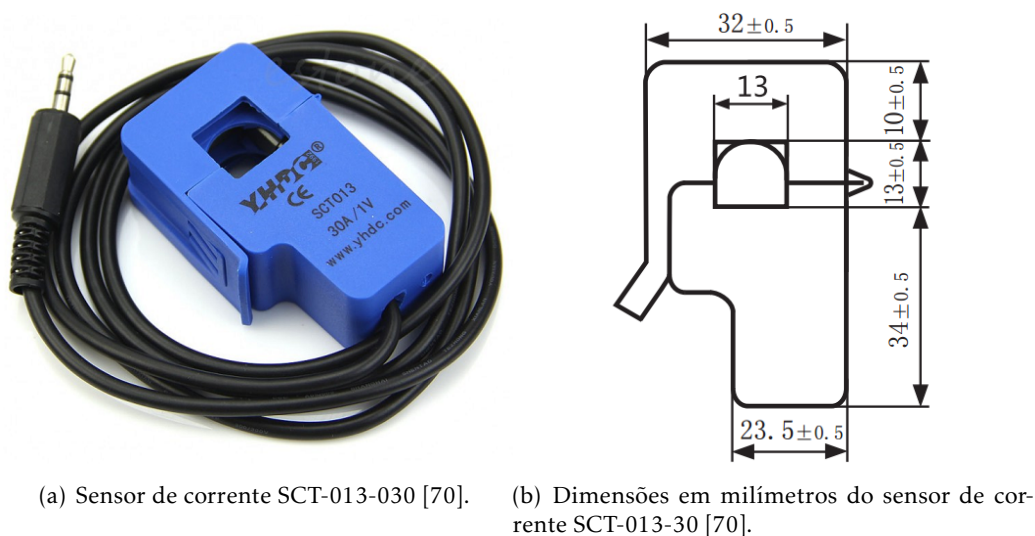


Figura 3.6: Sensor de corrente SCT-013-030 e respetivas dimensões.

Existe uma grande variedade de transformadores de corrente. Como neste trabalho se pretende medir um equipamento de cada vez e os transformadores de corrente disponíveis eram de 100 Ampere (A) ou 30 A, optou-se pelo de menor preço, pois ambos conseguem medir secções de cabo com a mesma dimensão, neste caso 13mm. O sensor escolhido incidu na marca YHDC SCT-013-030 de 30 A, conforme se pode ver na figura 3.6(a). Este sensor consegue medir corrente monofásica alternada até 30 A.

A tabela 3.6 ilustra as características técnicas do sensor escolhido.

Tabela 3.6: Características técnicas do sensor SCT-013-030, [70].

Modelo	SCT-013-030
Diâmetro da abertura	13 mm
Corrente de entrada	0-30 A
Rácio	1800:1
Tensão de saída	0-1V
Resistência interna	62Ω
Não linearidade	± 1%

Este sensor tem a capacidade de medir dispositivos com consumo de corrente até 30A, ou potências até 6900 Watt (W), o que se pode considerar suficiente para a grande maioria dos equipamentos usados em ambiente doméstico, até porque, segundo [9], no final de 2010 existiam 5123302 consumidores de Baixa Tensão Normal (BTN) e cerca de 85% dos consumidores do mercado doméstico tinham uma potência contratada até 6.9 kVA, como se pode observar na figura 3.7, o que equivale a um limite de 30 A para toda a habitação em monofásico.

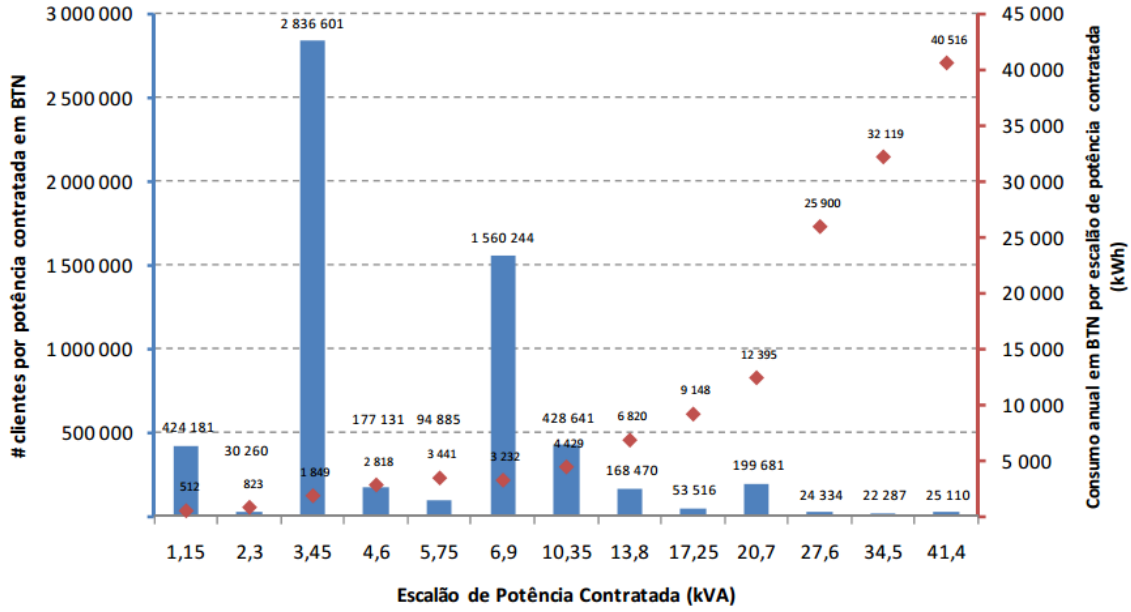


Figura 3.7: Número de clientes e consumo anual por escalão de potência contratada em Baixa Tensão Normal em 2010, [9].

Um transformador de corrente é um transformador de medida que está em curto-circuito. Devido ao facto de estar em curto-circuito, a tensão no secundário é nula, pelo que a força eletromotriz também é praticamente nula. Deste modo, o fluxo principal e, por consequência, a força magneto-motriz, são ambos nulos, [71].

Segundo [71], a corrente no circuito secundário é proporcional à corrente a circular no circuito primário de acordo com a equação (3.20).

$$I_{\text{secundário}} = I_{\text{primário}} \times N_{\text{espiras}} \quad (3.20)$$

Onde  $I_{\text{secundário}}$  representa o corrente nos enrolamentos no secundário,  $I_{\text{primário}}$  no primário e  $R\acute{a}cio$  corresponde ao rácio entre o número de espiras do primário e secundário, conforme a equação (3.21).

$$R\acute{a}cio = \frac{\text{Número de espiras no primário}}{\text{Número de espiras no secundário}} \quad (3.21)$$

O número de espiras existentes no transformador de corrente é de 1800, pelo que se conclui que a corrente no secundário é  $\frac{1}{1800}$  vezes da corrente existente no primário.

Um transformador de corrente necessita de ser utilizado em conjunto com uma resistência de carga ou *burden*, pois somente deste modo é que é completado (fechado) o circuito secundário do transformador de corrente. Esta resistência de carga é dimensionada de modo a fornecer um sinal de tensão  $U_{out}$ , que é proporcional à corrente do secundário,  $I_{secundário}$ . Para garantir que o transformador se encontra em curto-circuito, é necessário aplicar, no secundário, uma resistência de carga de valor baixo [71].

Neste tipo de sensores, o circuito secundário é galvanicamente isolado do circuito primário. Geralmente, é necessário garantir que, depois de instalados os sensores, não apresentem um circuito aberto, pois as correntes existentes podem-se tornar potencialmente perigosas. Em circuito aberto e com as correntes a circular no primário, a corrente no secundário será aproximadamente zero, a tensão no secundário será diferente de zero, sendo que o fluxo deixa de ser nulo, pelo que o núcleo aquece por fenómeno de histerese. Como tal, a utilização de um sensor de corrente exige precauções e um bom dimensionamento, [71].

Na figura 3.8(b), encontra-se representado o circuito elétrico do sensor de corrente, onde  $R_b$  representa a resistência de carga utilizada no secundário do transformador para produzir uma tensão de saída  $U_{out}$  proporcional à corrente do secundário,  $I_{Secundário}$ .

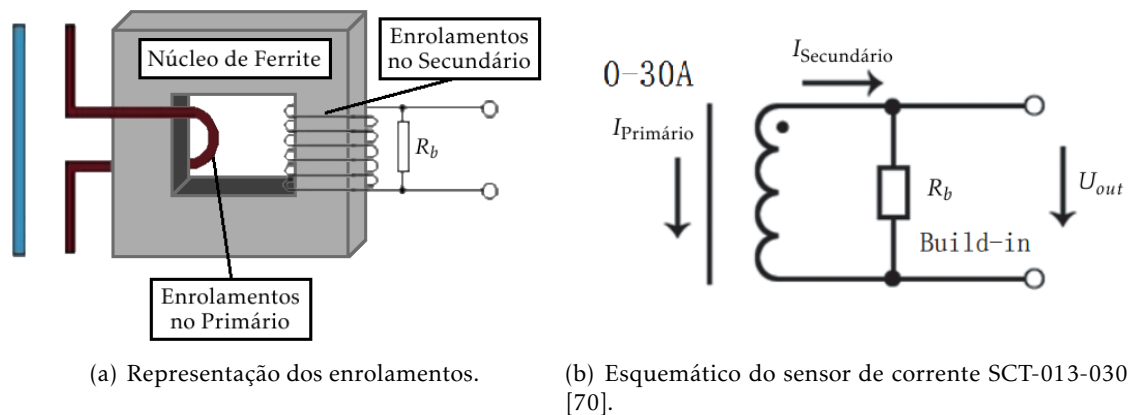


Figura 3.8: Sensor de corrente SCT-013-030 com respetivo esquemático e representação de enrolamentos.

Em suma, o funcionamento é feito por indução e tem na sua base um transformador com um enrolamento no primário e vários enrolamentos no secundário. O secundário compreende muitas voltas de fio fino e no primário enrolamento de poucas voltas de fio grosso. A corrente que flui pelo primário produz um campo magnético no núcleo, o que induz uma corrente no secundário.

### 3.8.3 Relé

Os relés (ver figura 3.9), são constituídos por componentes eletromecânicos capazes de controlar circuitos externos de grandes correntes, a partir de pequenas correntes ou tensões. Ou seja, acionando um relé com uma pequena tensão 5V e 50mA, podemos controlar um motor que esteja ligado a 230V e 2A, por exemplo.

Os relés funcionam da seguinte forma: quando uma corrente circula pela bobina, cria um campo magnético que atrai um ou uma série de contactos, fechando ou abrindo circuitos. Ao interromper essa corrente, o campo magnético também será interrompido, fazendo com que os contactos voltem para a posição original.

Podem ter algumas configurações referentes aos seus contactos: podem ser Normalmente Aberto (NA), Normalmente Fechado (NF). Os contactos NA são os que estão abertos enquanto a bobina não está energizada e que fecham quando a bobina recebe corrente. Os NF abrem-se quando a bobina recebe corrente, ao contrário dos NA. O contacto central, ou C, é o comum, ou seja, quando o contacto NA fecha é com o C que se estabelece a condução e o contrário com o NF.

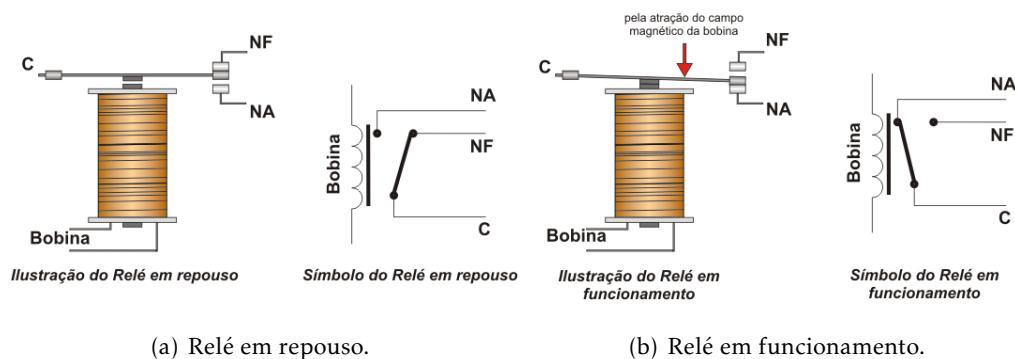


Figura 3.9: Funcionamento de um relé.

O objetivo do relé é utilizar uma pequena quantidade de energia eletromagnética (proveniente, por exemplo, de um pequeno interruptor ou circuito eletrônico simples) para mover um contacto que possa acionar uma quantidade de energia muito maior.

A principal vantagem dos relés é que o circuito de carga está completamente isolado do circuito de controlo, podendo inclusive trabalhar com tensões diferentes entre controlo e carga. A desvantagem é o fator do desgaste, pois, como o relé tem uma componente mecânica, existe uma vida útil.

Devem ser tidas em conta as limitações dos relés quanto a corrente e tensão máxima admitida entre os terminais, sob prejuízo de comprometer a vida útil do mesmo. Se não forem observados estes fatores, a vida útil do relé estará comprometida, ou até mesmo a do circuito controlado.

## IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo é feita uma abordagem da implementação e da arquitetura utilizada. Este capítulo foi subdividido em várias secções, apresentando-se de seguida, apenas as mais importantes.

Na primeira secção, 4.1, são apresentados os métodos e equipamentos utilizados na aquisição de dados. Na secção 4.2, são explicados os métodos de previsão abordados no capítulo anterior, mas com maior detalhe. Na secção 4.3, é apresentada a forma como foi feita a implementação da parte física (*hardware*), que diz respeito à monitorização individual de consumo de cargas, bem como o modo de atuação sobre estas (ligar/desligar), tendo por base a arquitetura proposta no capítulo anterior. Finalmente, na secção 4.5, é feita a demonstração da implementação efetuada nas duas secções anteriores, a qual é disponibilizada ao utilizador por meio de uma interface.



## 4.1 Aquisição de Dados

Um dos primeiros passos a dar para o desenvolvimento de um modelo que providencie uma previsão de consumo de elevada qualidade, é a quantidade de dados de boa qualidade, isto é, sem interrupções.

Para desenvolver o trabalho nesta dissertação, são necessários dados. Como não foi possível a obtenção dos mesmos, tomou-se a iniciativa de adquirir, manualmente, todos os dias à mesma hora, a leitura do contador para duas habitações. Numa primeira fase, desde 30 de setembro de 2015 até ao final do mesmo ano (para analisar os vários modelos de previsão) e, numa segunda fase, até agosto de 2016 (novo teste dos modelos implementados na primeira fase), obtendo assim dados para trabalhar no modelo de previsão.

Foi possível utilizar um contador inteligente, (ver figura 4.1(a)), que permite armazenar numa base de dados, informações como consumo, histórico de falhas de energia, potência contratada e tarifa horária. Este foi usado também como um modo de verificar o consumo de cada nó, (ver figura 3.2).

Com vista a uma melhor manobrabilidade do contador inteligente, foi feita em acrílico uma base de trabalho, para proteger o equipamento e respetivas interfaces de comunicação, conforme se pode observar na figura 4.1(a).



(a) Base em acrílico aplicada.

(b) PCB de monitorização implementado.

Figura 4.1: Equipamentos usados na aquisição de dados.

O contador inteligente, ou *Smart-Meter*, utilizado neste projeto, foi o *Energy Box* (EB), desenvolvido por Janz/Contar semelhante ao escolhido para o projeto *InovGrid* lançado pela Energias de Portugal (EDP). Este dispositivo permite a medição em tempo real dos parâmetros elétricos, consumo de energia, gestão de energia e ativação do serviço de



controle remoto de tarifas e potência contratada. Tem uma forma retangular e possui um ecrã para visualizar as informações disponíveis, um botão de controlo (amarelo) para aceder aos dados, como, por exemplo, consumo instantâneo, tipo de tarifa, tendo também uma porta circular, ao lado direito do visor, para efetuar leitura ótica, um uso exclusivo da entidade responsável, [72].

## 4.2 Modelo de Previsão de Consumo

Com os dados de histórico de consumo obtidos manualmente, com uma amostra diária obtida à mesma hora, desde outubro de 2015 a junho de 2016, ou seja, 274 dias, obteve-se a figura 4.2.

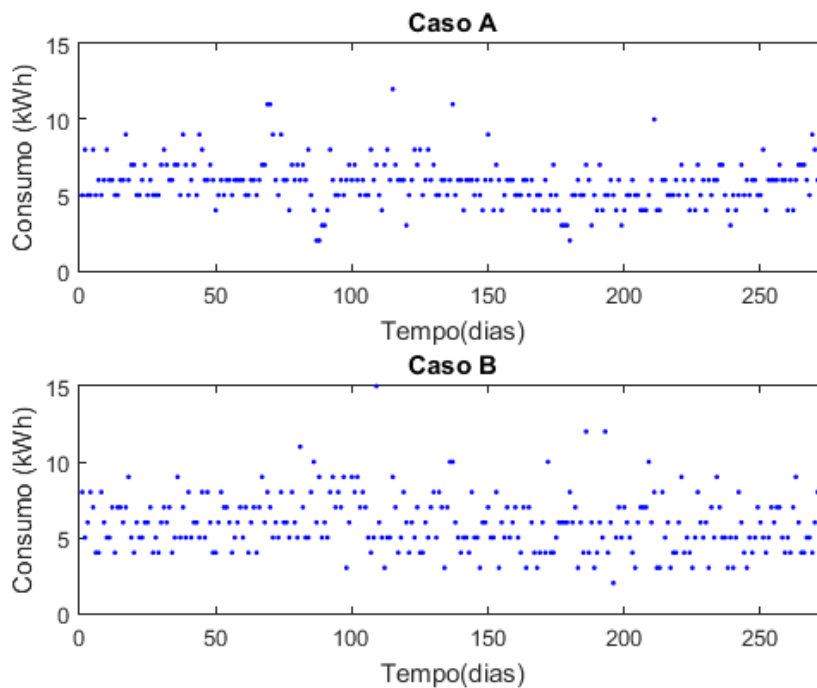


Figura 4.2: Consumo de energia real para dois casos desde outubro 2015 a junho 2016.

### 4.2.1 Procura do Modelo de Previsão de Consumo

Com vista a identificar qual o melhor modelo, conforme descrito no capítulo anterior, em primeira instância, recorreu-se à metodologia Box & Jenkins.

#### 4.2.1.1 Box & Jenkins

Foram analisando os dados em pormenor, na procura da existência de sazonalidade, para um primeiro caso (Caso A) e para um segundo caso (Caso B).

Utilizou-se o programa *Matlab*, usando um filtro de média simples, sem pôr em causa a perda de dados importantes, ou seja, o objetivo será apenas remover ou suavizar oscilações/variações bruscas no consumo, provenientes, por exemplo, de um elevado consumo

em determinado dia, ou ausência de consumidores na habitação e consequente redução de consumo, conforme descrito por [73] e [74].

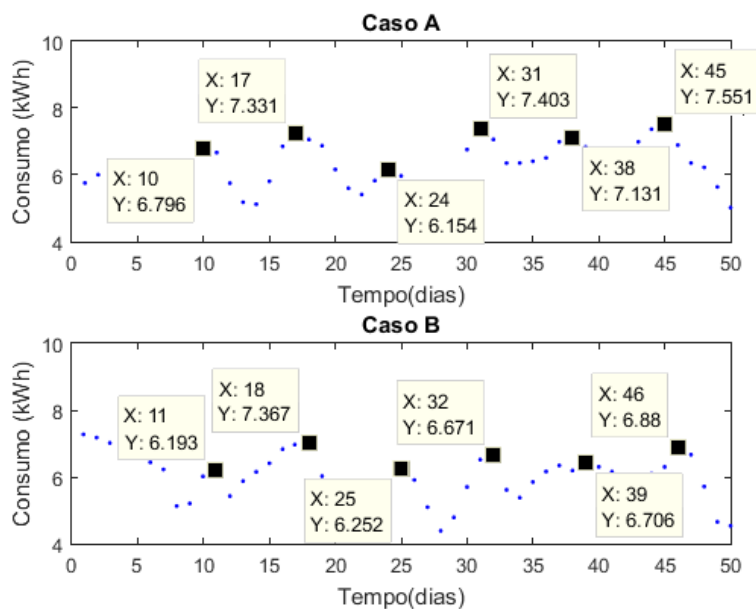


Figura 4.3: Consumo de energia real, após aplicação de filtro, para dois casos nos primeiros 50 dias.

Verifica-se que existe uma sazonalidade na série de consumos com período semanal para ambos os casos em estudo, conforme se pode observar na figura 4.3.

De seguida, um dos primeiros requisitos é analisar a estacionaridade da série temporal, para ambos os casos.

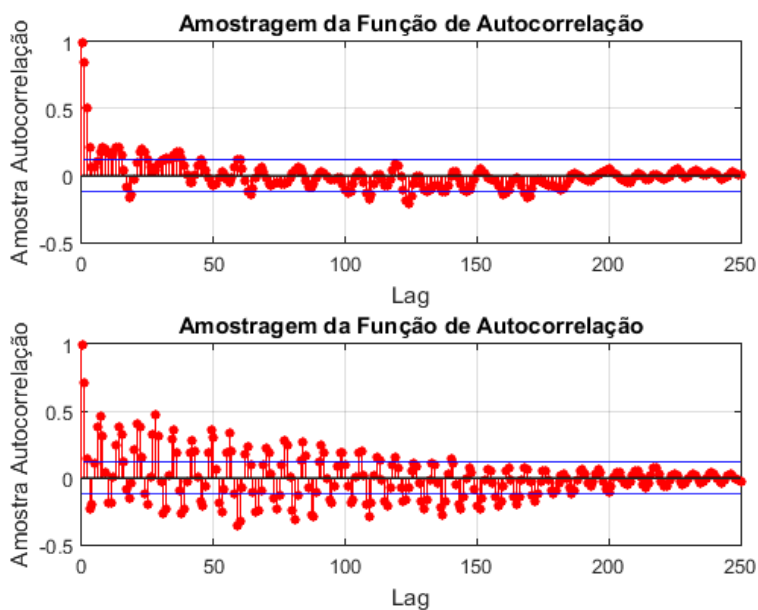


Figura 4.4: ACF - autocorrelação do consumo de energia para o Caso A (em cima) e Caso B (em baixo) de outubro 2015 a junho 2016.

Como se pode observar na figura 4.4, as amostras decaem lentamente, sendo que, no segundo caso (o que se encontra em baixo), se verifica o decaimento mais lento, não se verificando a estacionariedade, devido à existência de uma raiz unitária para a hipótese nula, ao aplicar-se o teste de *Dickey-Fuller*, usando o *software EViews 9.5 Student* [75].

Uma das maneiras de resolver a questão, segundo a metodologia Box & Jenkins, é a diferenciação. Seguidamente foi efetuada, a diferenciação até à terceira ordem, usando sempre o teste de *Dickey-Fuller*, mas, mesmo assim, existiu sempre uma raiz unitária para o teste de hipótese nula. Não faz, assim, sentido continuar a metodologia Box & Jenkins, pois uma das premissas para prosseguir para o próximo passo, seria a de a série ser estacionária.

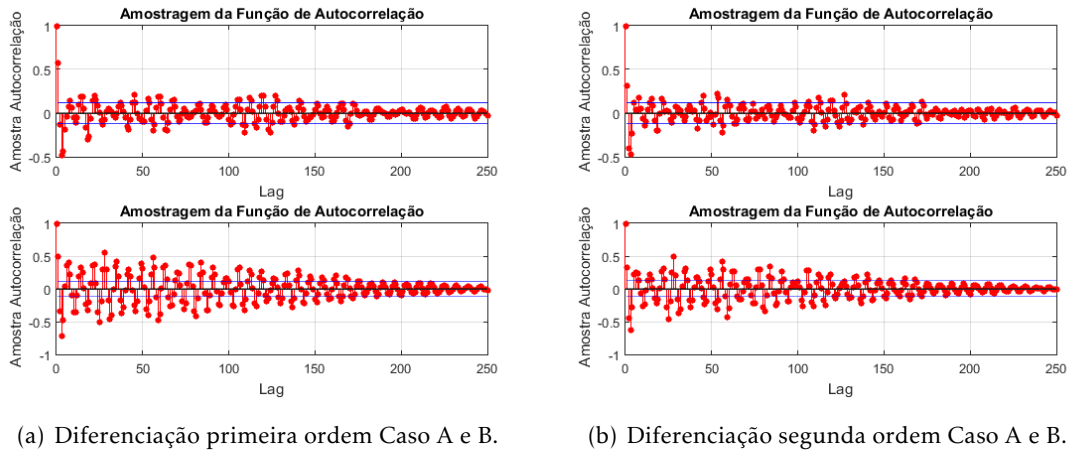


Figura 4.5: ACF - autocorrelação do consumo de energia com uma e duas diferenciações, para o Caso A e B de outubro 2015 a junho 2016.

#### 4.2.1.2 Média Móvel Simples

Como se verificou uma sazonalidade de período semanal, optou-se por fazer a média da primeira semana e projetar essa média para o número de dias respeitante a cada mês.

Esta técnica, denominada de média móvel simples, consiste em calcular a média aritmética das observações mais recentes, ou seja,

$$M_t = \frac{Z_t + Z_{t-1} + \dots + Z_{t-k+1}}{k} \quad (4.1)$$

Sendo que  $k$  representa o comprimento da média, neste caso o número de dias/amostras.

Desta forma,  $M_t$  é uma estimativa do nível  $\mu_t$  que não leva em consideração as observações mais antigas.

A solução proposta é a de considerar,

$$M_t = \frac{Z_t + Z_{t-1} + \dots + Z_{t-k+1}}{k} \times N_{dm} \quad (4.2)$$

Sendo que  $N_{dm}$  representa o número de dias a projetar, ou seja, o número de dias de cada mês. Posteriormente, esta projeção é atualizada semanalmente.

Tabela 4.1: Tabela de resultados de previsão usando o método de Média Móvel Simples

	<b>Caso A (3 habitantes)</b>		<b>Caso B (3 habitantes)</b>	
	MAPE [%] 7 dias	Consumo real [kWh]	MAPE [%] 7 dias	Consumo real [kWh]
<b>Outubro</b>	1.06	188	1.64	183
<b>Novembro</b>	8.65	185	1.66	181
<b>Dezembro</b>	0.53	187	6.40	203

Analisando melhor a causa da existência de disparidades, quase na ordem das dezenas, em alguns meses, ao fim do período de uma semana, conforme se pode observar na tabela 4.1, verificou-se que, no (Caso A), no mês de dezembro, advém de um pico de dois dias seguidos, em que foi consumido o dobro da média diária do mês, tendo sido depois dissolvido pelo dia de Natal e Ano Novo.

Quanto ao (Caso B), como tem um consumo em que não existem variações tão bruscas, as previsões para este modelo acabaram por ser menos sacrificadas. No entanto, existiu um pico elevado em dezembro, que se refletiu na precisão.

Conclui-se assim que, em casos de picos bastante elevados relativamente à média diária, ou ausência de pessoas na habitação, pelas mais variadas razões, bastam apenas poucos dias para se refletir na precisão deste modelo.

#### 4.2.1.3 Suavização Exponencial Simples

Enquanto que na média móvel simples as observações usadas para encontrar a previsão contribuem em igual proporção para o seu cálculo, na suavização exponencial simples, as informações mais recentes são evidenciadas pela aplicação de um fator que determina essa importância [46].

A previsão de todos os valores futuros é dada pelo último valor exponencialmente suavizado, que pode ser interpretado como uma equação de atualização de previsão, quando tivermos uma nova observação.

A equação seguinte representa a fórmula da Suavização Exponencial Simples,

$$Z_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) Z_t \quad (4.3)$$

Nesta equação, podemos constatar que  $Z_{t+1}$  baseia-se no peso  $\alpha$  dado a  $Y_t$  (a observação mais recente) e no peso  $(1 - \alpha)$  dado a  $Z_t$  (previsão mais recente).

Neste caso, ao analisar a tabela 4.2 que contém os erros de previsão, verificou-se uma melhoria significativa, em termos gerais, na previsão do consumo do (Caso B), visto que acabou por anular um pico de consumo em dezembro.

Tabela 4.2: Tabela de resultados de previsão usando o método de Suavização Exponencial Simples

	Caso A (3 habitantes)		Caso B (3 habitantes)	
	MAPE [%] 7 dias	Consumo real [kWh]	MAPE [%] 7 dias	Consumo real [kWh]
<b>Outubro</b>	4.04	188	0.56	183
<b>Novembro</b>	5.86	185	2.63	181
<b>Dezembro</b>	1.41	187	0.07	203

### 4.3 Bloco Nó Sensor

Nesta arquitetura (figura 3.2), os sensores são responsáveis por medir a quantidade física desejada, processar a informação e depois transmiti-la para a base de dados. Em termos de componentes, este trabalho foi constituído com o seguinte material:

- Microcontrolador (*ATmega2560*).
- *Transceiver* de rádio frequência (ESP8266-01).
- Sensor de corrente não invasivo (SCT-013-030).
- Fonte de alimentação DC de 12 Volt.
- Relé (10A 250VAC).
- Monitor LCD com 16x2 linhas.
- *Router Wi-Fi*.
- Contador Inteligente (*Smart-Meter*).

#### 4.3.1 *ATmega2560*

A escolha do microcontrolador recaiu sobre *ATmega2560* da *Atmel*, que seria a escolha óbvia desde o início, uma vez que foi planeado usar a plataforma Arduino, devido à sua plataforma *open source*, preço, existência de vários módulos de expansão compatíveis e à sua versatilidade e flexibilidade de ligações ao microcontrolador.

As características fundamentais deste microcontrolador podem ser vistas na tabela 3.2 do capítulo 3. A partir da comparação dos microcontroladores, este foi o único que apresentava a quantidade de pinos entrada/saída necessários, nomeadamente ter mais que uma UART, o que pode ser importante em termos de escalabilidade.

É possível comprar apenas o microprocessador individualmente, ou usar placas já prontas, como o Arduino Mega2560, com preços acessíveis. A figura 4.6 mostra a placa utilizada no desenvolvimento da plataforma.

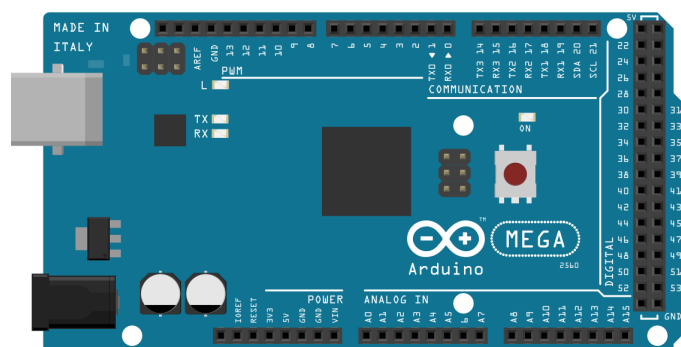


Figura 4.6: Figura de exemplo da placa de desenvolvimento utilizada, [76].

### 4.3.2 Calibração Sensor de Corrente

Após pesquisa para escolher o sensor de corrente, foi escolhido um sensor não invasivo YHDC SCT-013-030, por ter uma não linearidade pequena (de  $\pm 1\%$ ) e para a proposta de monitorização residencial de energia, o referido sensor não precisa de estar ligado fisicamente a uma fase, pois este sensor funciona com base no efeito de *hall*, com um núcleo que pode ser dividido em dois, sendo que a fase, quando colocada no seu interior, consegue medir corrente entre 0 e 30 A. Como é um sensor de corrente, o sinal da corrente tem de ser convertido para um sinal de tensão, com uma resistência de carga (*burden*).

Quanto aos valores passados, variam entre 0 e 1 Volt. Para o Arduino, tem que se transformar essa variação em valores que as portas analógicas consigam ler, que são entre 0 e 5 Volt. Para isso, é feito um circuito de equivalência, para que a variação seja proporcional à variação da corrente. Para que o sinal não ultrapasse o pico do divisor de tensão, é calculada uma resistência que funciona de limitador, para que o Arduino não receba valores negativos.

Seguindo o exemplo de calibração de acordo com o autor [70], usando um sensor que mede corrente entre 0 e 100A, e que tem um rácio entre enrolamentos de 2000:1, têm que se efetuar os seguintes cálculos:

Com 100A de corrente máxima,

Corrente de pico no primário,  $I_p = I_{RMS} \times \sqrt{2} = 100 \times \sqrt{2} = 141.42A$

Corrente de pico no secundário,  $I_s = \frac{\text{Pico no primário}}{n^\circ \text{ enrolamentos}} = \frac{141.42}{2000} = 70.71 \text{ mA}$

$$\text{Resistência ideal} = \frac{\text{Tensão de pico no arduino}}{\text{Corrente de pico no secundário}} = \frac{5 \div 2}{0.07071} = 34.47 \Omega$$

Olhando para a figura 4.7, o exemplo de calibração por parte do *datasheet*, a resistência a implementar seria de  $33\Omega$ , que é o valor mais aproximado da resistência dimensionada, ( $34.47\Omega$ ), presente no mercado.

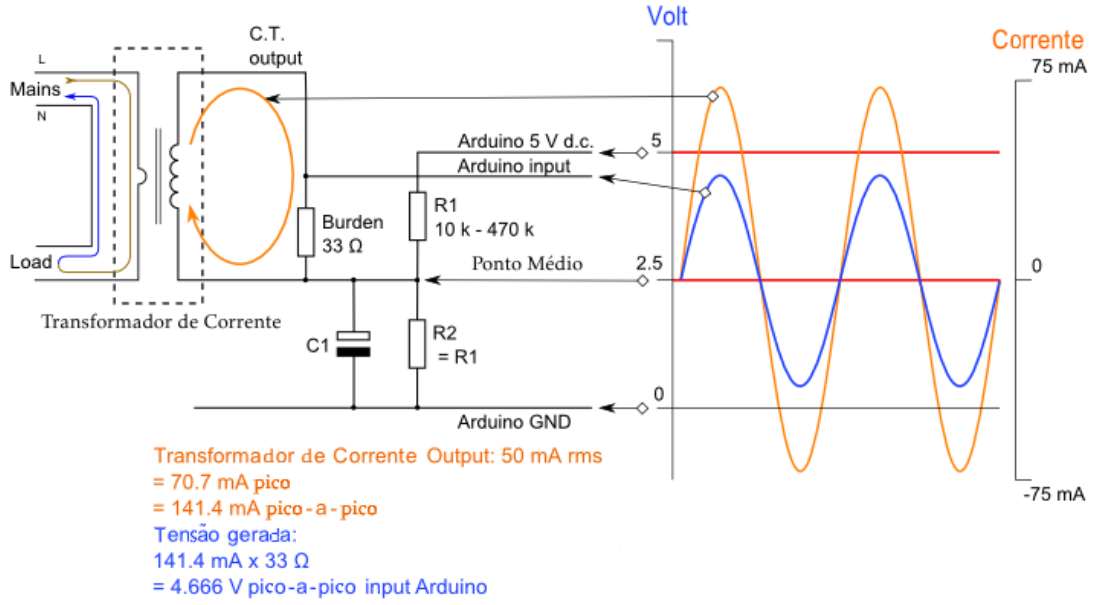


Figura 4.7: Exemplo de calibração do sensor de corrente SCT-013-000 com divisor de tensão e limitador de carga, [70].

Para o caso do sensor adotado, que tem uma menor linearidade  $\pm 1\%$  face aos  $\pm 3\%$ , um rácio de 1800:1 em vez de 2000:1, então a resistência ideal seria:

$$\text{Corrente de pico no primário} = I_{RMS} \times \sqrt{2} = 30 \times \sqrt{2} = 42.4A$$

$$\text{Corrente de pico no secundário} = \frac{\text{Corrente de pico no primário}}{n^{\circ} \text{ enrolamentos}} = \frac{42.4}{1800} = 23.57mA$$

$$\text{Resistência ideal} = \frac{\text{Tensão de pico no arduino}}{\text{Corrente de pico no secundário}} = \frac{5 \div 2}{0.02357} = 106.066\Omega$$

Tendo uma corrente pico a pico de  $47.14mA$  e a tensão de saída pico a pico pela lei de Ohm é de  $4.99V$ , usando a resistência ideal.

Deverá ser  $106\Omega$ , o valor a colocar em paralelo com os terminais do sensor, mas, como este sensor já tem uma resistência de  $62\Omega$ , apenas se colocará o divisor de tensão.

Então, pela Lei de Ohm,  $V_{pp} = I_{pp} \times 62 = 2.923V$ , como a porta analógica de *input* do Arduino lê valores de tensão entre 0 e 5V, é necessário chegar a valores de  $V_{pp}$  próximos de 5V.

Sabendo que o Arduino fornece uma tensão de  $V_{in} = 5V$ , fazendo as contas,

$$V_{out} = V_{in} - 2 \times \text{Corrente de Pico no secundário} = 5 - 2 \times 0.02357 = 2.077V$$

Para maximizar as leituras do Arduino entre 0 e 5V necessita-se assim de um valor até  $2.08V$ .

Sabendo que a fórmula do divisor de tensão é:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (4.4)$$

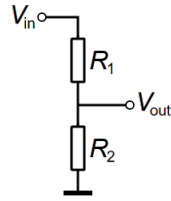


Figura 4.8: Exemplo divisor de tensão

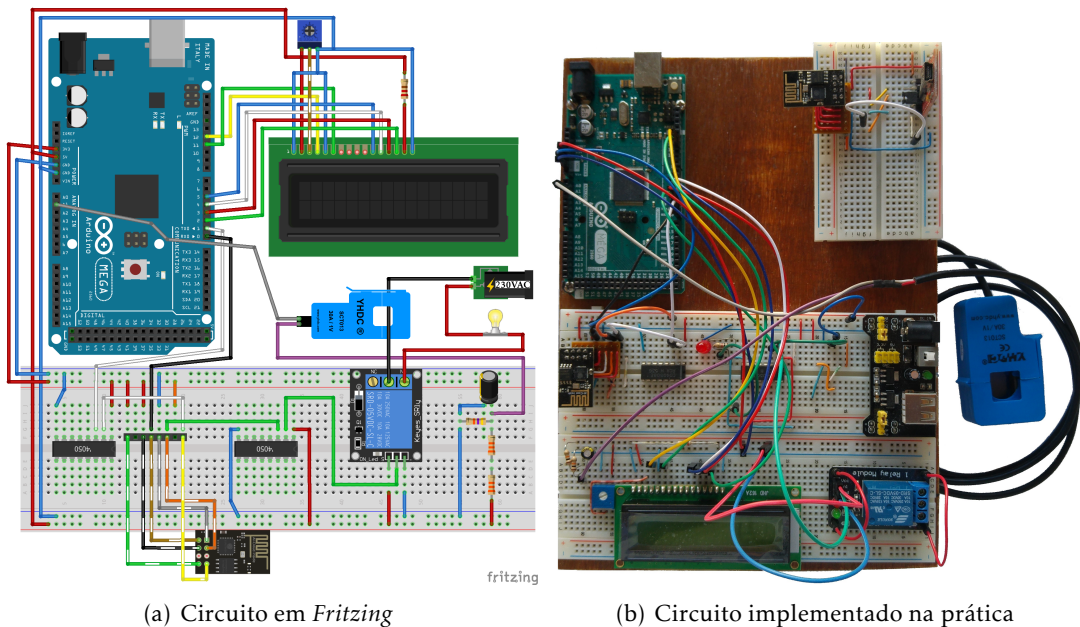
Fixando  $R_2 = 47k\Omega$  com  $V_{in} = 5V_{olt}$  provenientes do Arduino e  $V_{out} = 2.08V_{olt}$  chega-se à conclusão de que é necessária uma resistência  $R_1 = 66.128k\Omega$  ou duas de  $33k\Omega$  em série.

A figura 4.8 ilustra o divisor de tensão criado para a variação da corrente e tensão ser reconhecida pelo Arduino em valores positivos. Para suavizar a leitura, nomeadamente o pico no instante inicial que possa ocorrer na leitura, colocou-se um condensador de  $10\mu F$  em paralelo com  $R_2$ .

Posteriormente, como o Arduino tem um conversor analógico para digital de 10 *bit*, isto significa que a tensão de entrada, entre 0 e 5 Volt, irá ser convertida em valores inteiros entre 0 e 1023, ou seja, 1024 valores =  $2^{10}$  onde se obtém uma resolução de  $4.9mV$  por unidade [77].

### 4.3.3 Esquemático do *Hardware*

Conforme se pode verificar na figura 4.9, foi desenhado com o programa *Fritzing* todo o circuito utilizado que corresponde a um único nó, ou seja, monitoriza um único equipamento.

(a) Circuito em *Fritzing*

(b) Circuito implementado na prática

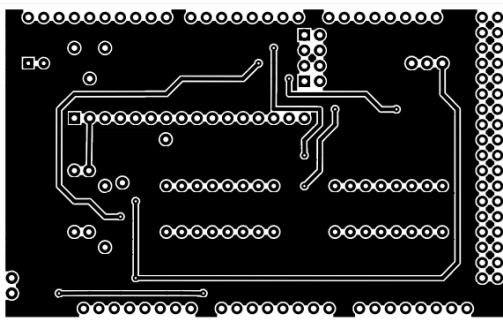
Figura 4.9: Exemplo do circuito elaborado para um equipamento.



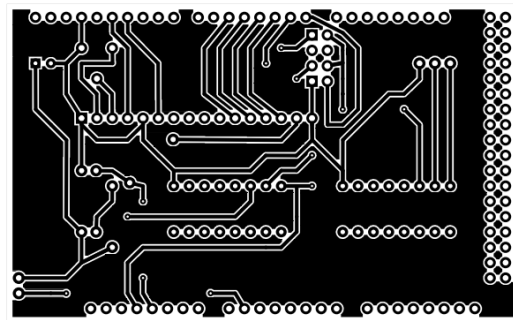
### 4.3.3.1 Placa de Circuito Impresso

A elaboração de uma Placa de Circuito Impresso (PCB), apenas foi possível desenhá-la em duas camadas (*layers*), devido à natureza do circuito da figura 4.9(a).

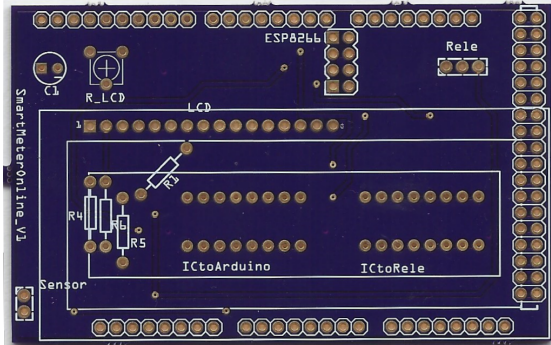
Como o circuito foi desenhado com o objetivo de fazer uso das ligações standardizadas do Arduino, após a elaboração desta placa de circuito impresso, é de esperar que funcione em qualquer placa Arduino ou compatível, sendo para isso apenas necessário que funcione com o IDE desenvolvido pela Arduino e que respeite o standard de interface físico.



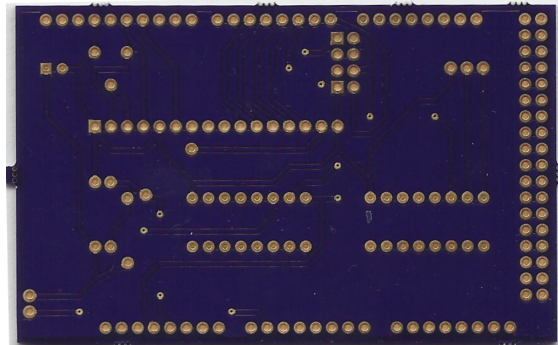
(a) Parte de cima do PCB



(b) Parte de baixo do PCB



(c) PCB real, parte de cima



(d) PCB real, parte de baixo

Figura 4.10: Exemplo de placa de circuito impresso (PCB) de duas camadas elaborado com o software *Fritzing* e implementada.

## 4.4 Monitorização de Consumo

Nesta secção é descrito o modo de funcionamento da monitorização de consumo, do corte de energia de cada carga, bem como a maneira de enviar um aviso ao consumidor.

Na parte de interface, descrita com mais detalhe na secção 4.5, dentro do menu "consultar configurações" são disponibilizados ao utilizador três opções binárias para cada carga (equipamento): "estado", "monitorização" e "prioritário".

Quando a opção "monitorização" é ativada (posição "ON"), significa que os consumos instantâneos da respetiva carga serão guardados na base de dados com um período de aproximadamente 10 minutos. Ao ativar a opção "prioritário", significa que é um equipamento fundamental na habitação (por exemplo frigorífico), e não é autorizado o corte de energia. No que diz respeito ao "estado", permite verificar se o equipamento está ligado ou desligado atualmente, bem como o ligar ou desligar manualmente.

Para ajudar o consumidor a atingir os objetivos de consumo a que se propôs, no início do mês procede-se da seguinte forma: a partir do meio do mês é verificado o consumo total da habitação até então: caso o consumo seja superior a 50% da energia comprada inicialmente, é verificado se o equipamento é prioritário e, caso seja, não toma qualquer ação. Caso não seja, é verificado se a monitorização está ativa e se existe histórico do dia da semana equivalente. Em caso afirmativo, é verificado o consumo anterior e, se corresponder a um período de inativação ou estado de baixo consumo (*standby*), a carga é desativada e o consumidor é notificado por email. Caso estejam desativadas as opções "prioritário" e "monitorização", não é tomada qualquer ação sobre a carga.

Em qualquer caso, quando o consumo total da habitação previsto, com base no consumo corrente, se prevê vir a ser superior ao inicialmente comprado, o consumidor é notificado por email com a indicação, da quantidade que se prevê que o consumo (em kWh) seja ultrapassado.

### 4.5 Ferramentas Utilizadas

Nesta secção serão abordadas as ferramentas analisadas que permitiram o desenvolvimento e implementação da interface gráfica.

#### PHP

O *Hypertext Preprocessor* (PHP) é uma linguagem de *script open source* muito utilizada no desenvolvimento de aplicações *web* para *HyperText Markup Language* (HTML). Entre as principais funções que determinaram a escolha de utilização do PHP neste trabalho, está o facto de ser executado no servidor. Assim, o código nunca é mostrado ao utilizador final, mantendo a integridade do mesmo.

Esta linguagem surgiu em meados de 1994, como um pacote de programas *Common Gateway Interface* (CGI), com o nome de *Personal Home Page Tools*, para substituir um conjunto de scripts Perl que eram utilizados no desenvolvimento de páginas Web.

Comparativamente, o PHP já mostrou ser superior ao pago *Active Server Pages* (ASP) em requisitos como simplicidade de ligação a bases de dados, desempenho, gestão de memória, além de ser distribuído sob licença *General Public License* (GPL) e de correr em inúmeras plataformas. Outro ponto positivo é ter atualizações frequentes, com publicações de novas versões regularmente, sendo este um ponto importante no que diz respeito à segurança.

## Apache

O presente trabalho utiliza linguagens interpretadas pelo navegador (*browser*). Posto isto, é necessária a utilização de um servidor *web* capaz de interpretar as consultas que chegam à porta associada ao protocolo *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) (por padrão, porta 80), e de fornecer uma resposta com este mesmo protocolo.

Entre os principais servidores *web* está o Apache (ver figura 4.11), sendo um dos servidores mais conhecidos da Internet. É uma aplicação capaz de ser executada em diferentes tipos de sistemas operacionais. O nome Apache provém do modo como ele foi desenvolvido ("A *patchy server*"), pois é o produto de uma série de correções sucessivas de *software*, que permite torná-lo uma solução segura. Outro ponto positivo é ser gratuito, ter atualizações frequentes, com publicações de novas versões regularmente, assim que são detetadas falhas, sendo este um ponto importante no que diz respeito à segurança.

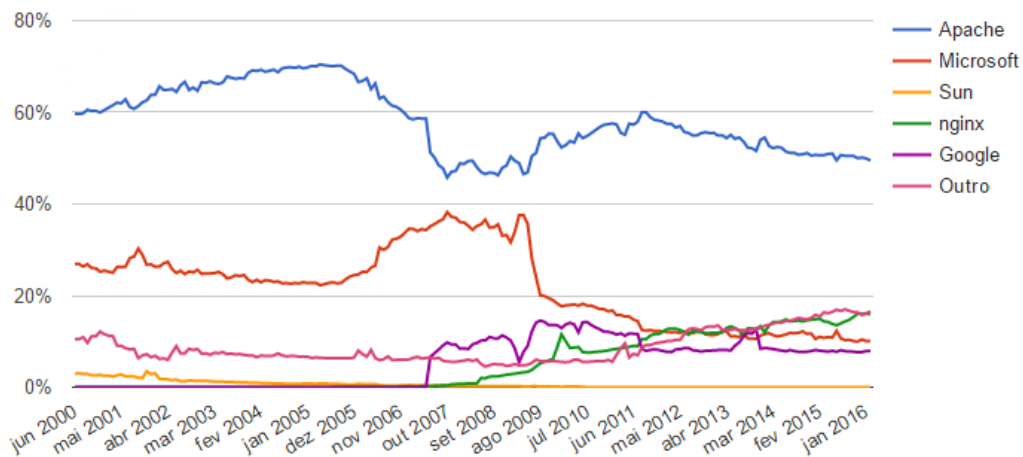


Figura 4.11: Quantidade de sites ativos tendo como base o tipo de Servidor, [78]

## MySQL

O MySQL é um gerenciador de base de dados gratuito e de código aberto. Destaca-se por ser desenvolvido pela colaboração da comunidade, através de um modelo de *Software* livre. Utiliza a linguagem de programação SQL (*Structured Query Language*), que é o padrão de linguagem mais usado em base de dados.

Existem várias bases de dados que suportam e usam o padrão SQL, mas cada uma delas possui extensões proprietárias que adicionam novas funcionalidades ao padrão. Na Internet atual, praticamente todos os servidores de hospedagem suportam MySQL, exatamente pelo facto de ser gratuito, tal como o PHP, e pelo facto de os dois trabalharem muito bem em conjunto.

Alguns concorrentes do MySQL são o Oracle, PostgreSQL, Microsoft SQLServer e MongoDB. Entre estes, a única base de dados de grande porte totalmente livre e com código fonte aberto, é o MySQL.

Tabela 4.3: Comparativo das base de dados mais utilizadas, [79].

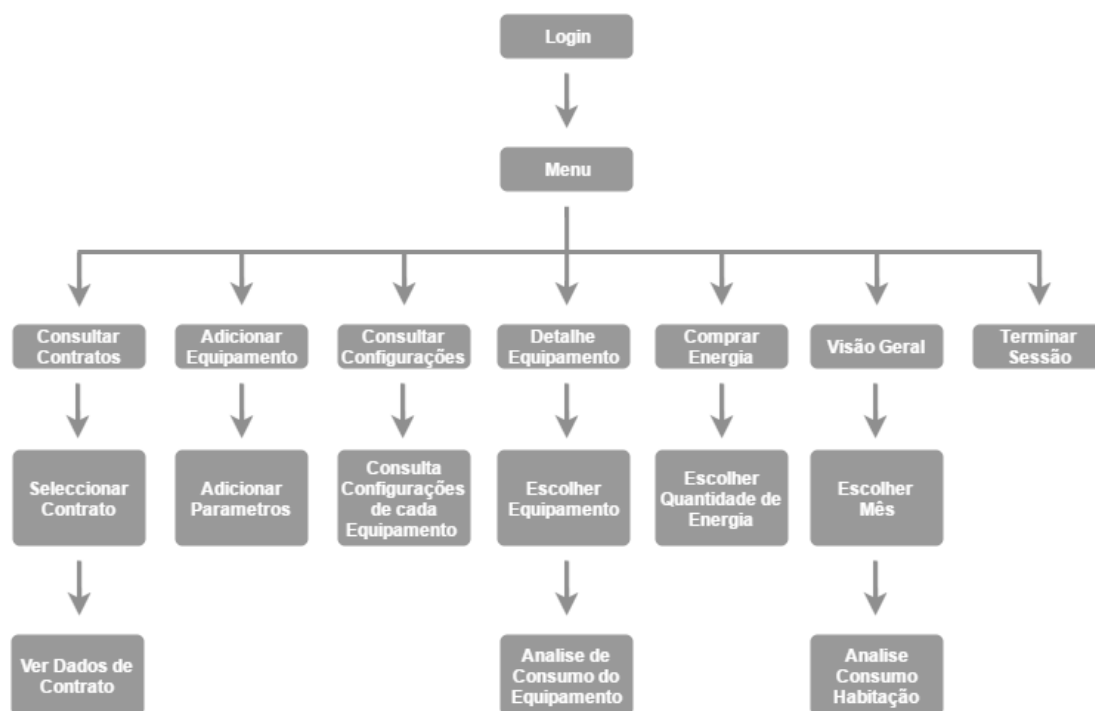
<b>Ranking</b>	<b>Motor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Licença</b>
1	Oracle	Relacional	Comercial
2	MySQL	Relacional	Código aberto
3	Microsoft Sql Server	Relacional	Comercial
4	MongoDB	Armazenamento em documentos	Código aberto
5	PostgreSQL	Relacional	Código aberto

## WampServer

Neste trabalho optou-se pela utilização do WampServer, pelo facto de ser grátis, e incluir suporte para MySQL, PHP e Apache Server. Tem também suporte multi-plataforma (Microsoft Windows, GNU/Linux, e MacOS), variando apenas a versão. Para Linux, por exemplo, chama-se LampServer.

### 4.5.1 Software Aplicacional

Para facilitar o acesso, por parte do consumidor final, à pré-compra de energia elétrica, à monitorização de equipamentos e ao ativar/desativar dos mesmos, foi elaborada uma interface *web* multi-plataforma, que corresponde à seguinte estrutura:

Figura 4.12: Estrutura da interface *web*.

### 4.5.2 Interface Gráfica

Após definida a proposta de *software* para implementar a interface web em HTML, na figura 4.12, o resultado gráfico obtido foram as seguintes figuras:

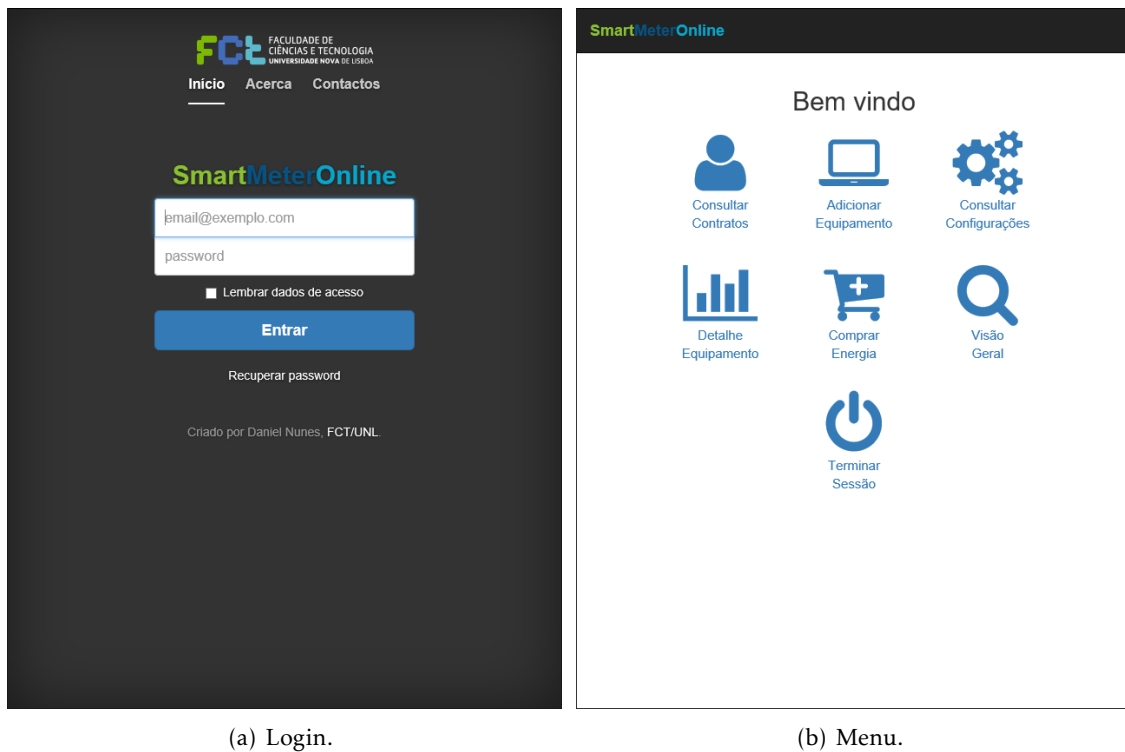
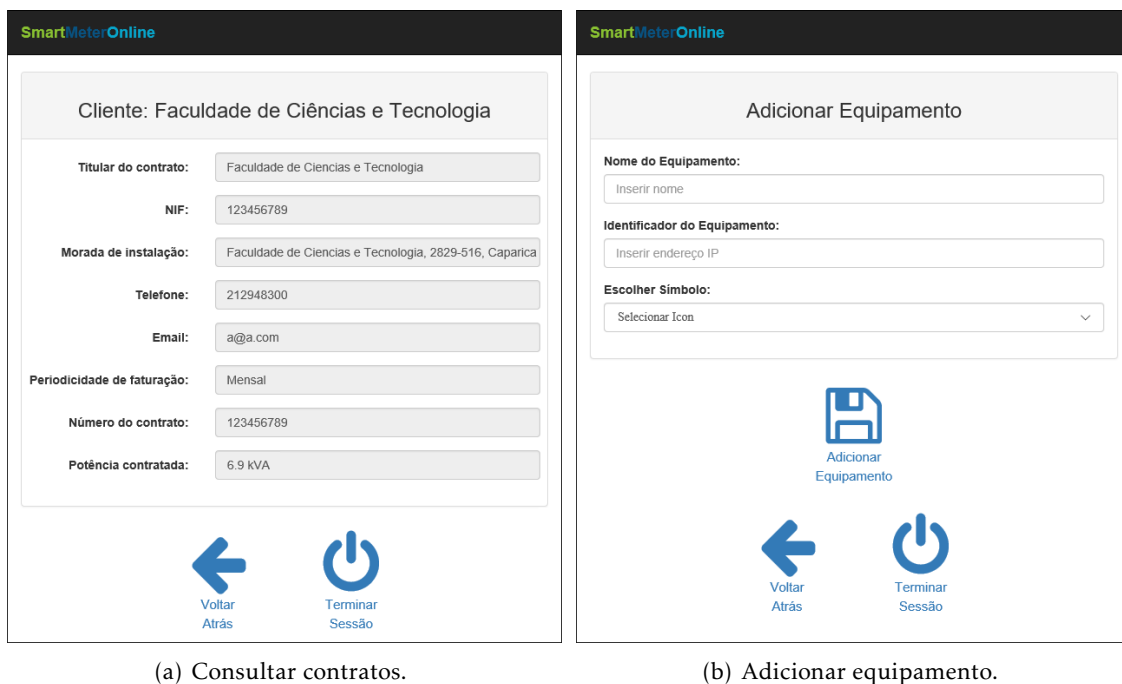


Figura 4.13: Interface gráfica - login, menu.

O início da interface gráfica efetua-se através de uma área de *login* (ver figura 4.13(a)), em que o utilizador coloca o seu *username* (e-mail) e uma *password*, devendo de seguida clicar no botão, "entrar".

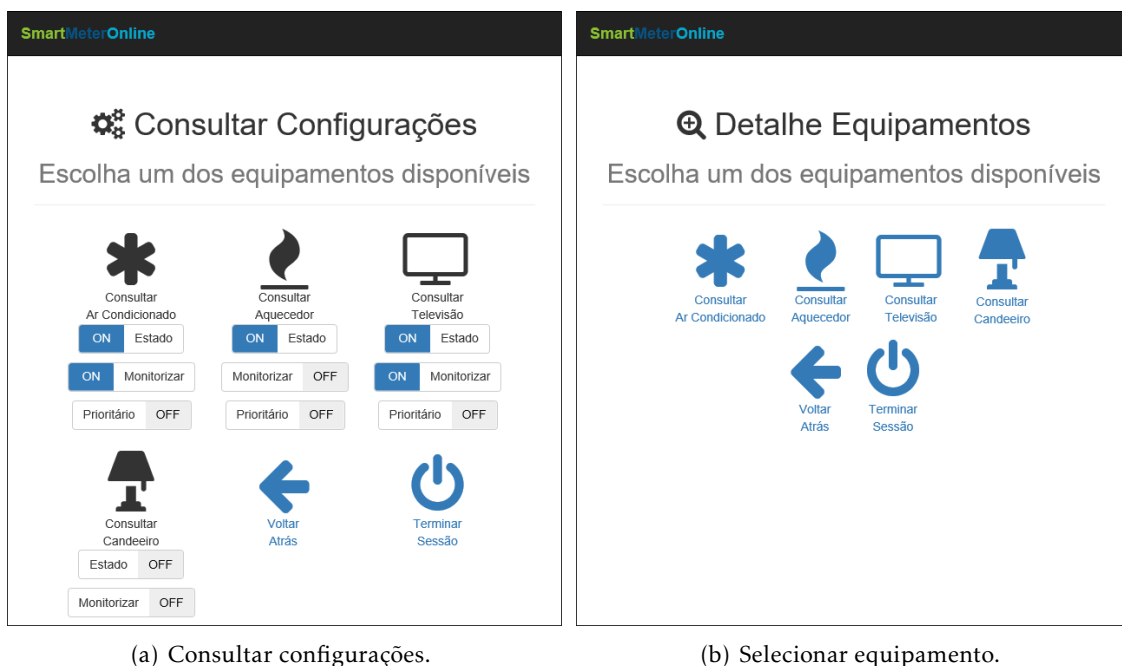
Após o *login* efetuado com sucesso, o utilizador é redirecionado para o menu principal, conforme se pode observar na figura 4.13(b). São disponibilizadas várias opções ao utilizador as quais se passam a descrever pela respetiva ordem, da esquerda para a direita e de cima para baixo, como por exemplo: "consultar Contrato", "adicionar equipamento", "consultar configurações", "detalhe de equipamento", "comprar energia", "visão geral", e, por último, "terminar sessão".



(a) Consultar contratos. (b) Adicionar equipamento.

Figura 4.14: Interface gráfica - consultar contrato, adicionar equipamento.

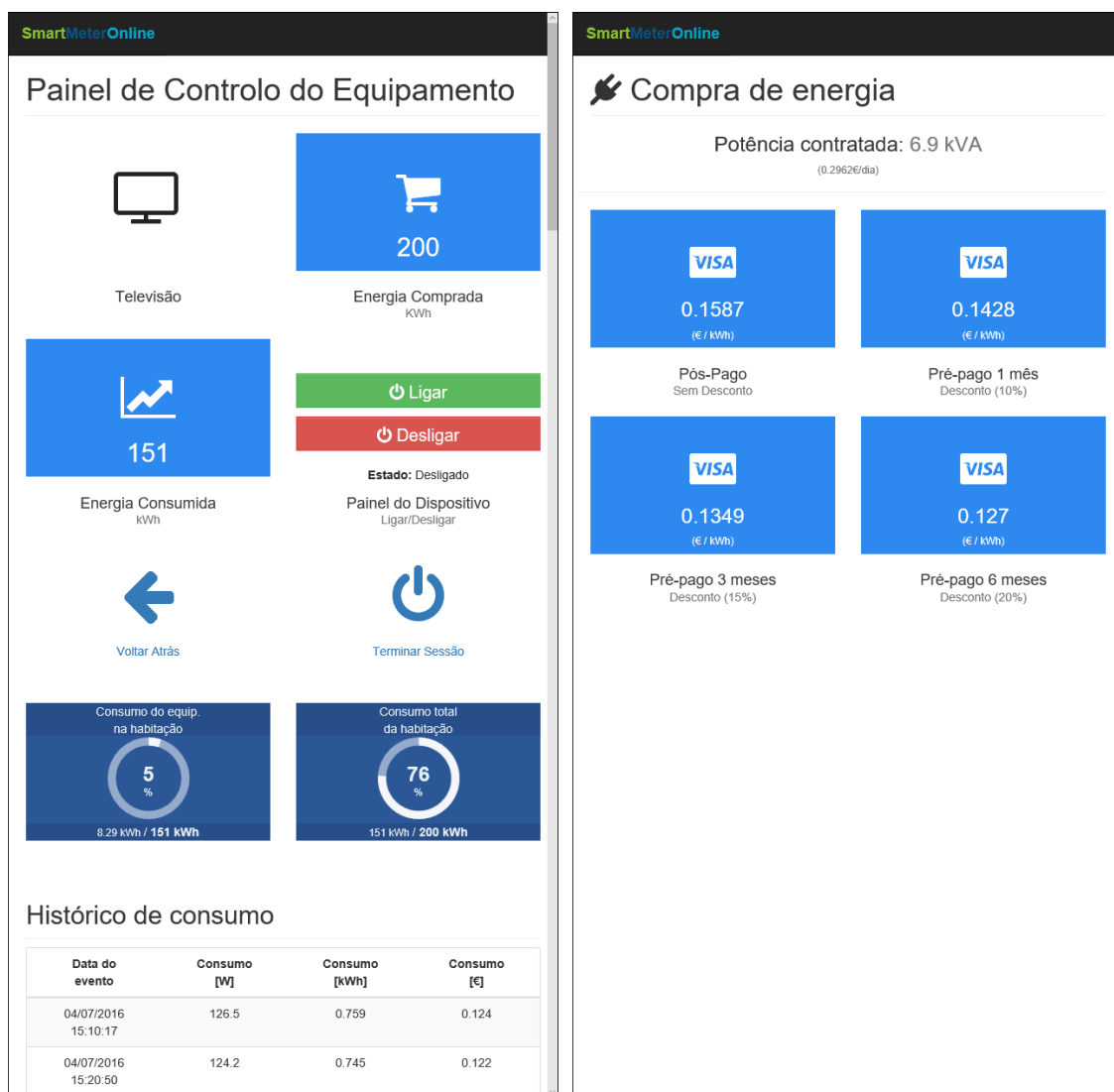
A figura 4.14(a), "consultar contrato", apresenta todos os contratos que o utilizador tem. Já a figura 4.14(b), sub-menu "adicionar equipamento", permite ao utilizador adicionar novos equipamentos a serem monitorizados.



(a) Consultar configurações. (b) Selecionar equipamento.

Figura 4.15: Interface gráfica - consultar configurações, selecionar equipamento.

Depois de seleccionar o sub-menu, "configurações" (ver figura 4.15(a)), o utilizador consegue visualizar a lista de todos os equipamentos que estão a ser monitorizados, bem como ligar/desligar e ver o seu estado atual. Após o utilizador entrar no sub-menu, "detalhe Equipamento", é redirecionado para uma página que mostra os equipamentos adicionais (ver figura 4.15(b)).



(a) Detalhe do equipamento.

(b) Comprar energia.

Figura 4.16: Interface gráfica - detalhe do equipamento, comprar energia.

Após seleccionar o equipamento, é redirecionado para o sub-menu, "detalhe de equipamento" (ver figura 4.16(a)), que permite ao utilizador visualizar a energia comprada, energia total consumida, ligar/desligar o equipamento e ver o seu estado, voltar atrás, terminar sessão, percentagem de consumo da habitação *vs* energia comprada, percentagem de energia consumida pelo equipamento *vs* energia total consumida na habitação e ver uma tabela com o histórico de consumo desse equipamento em W, kWh, e em euros.

O sub-menu, "comprar energia", conforme se pode ver na figura 4.16(b), lista os preços do kWh e correspondente preço de potência em que são apresentados preços diferentes, conforme se compra para um ou mais meses.

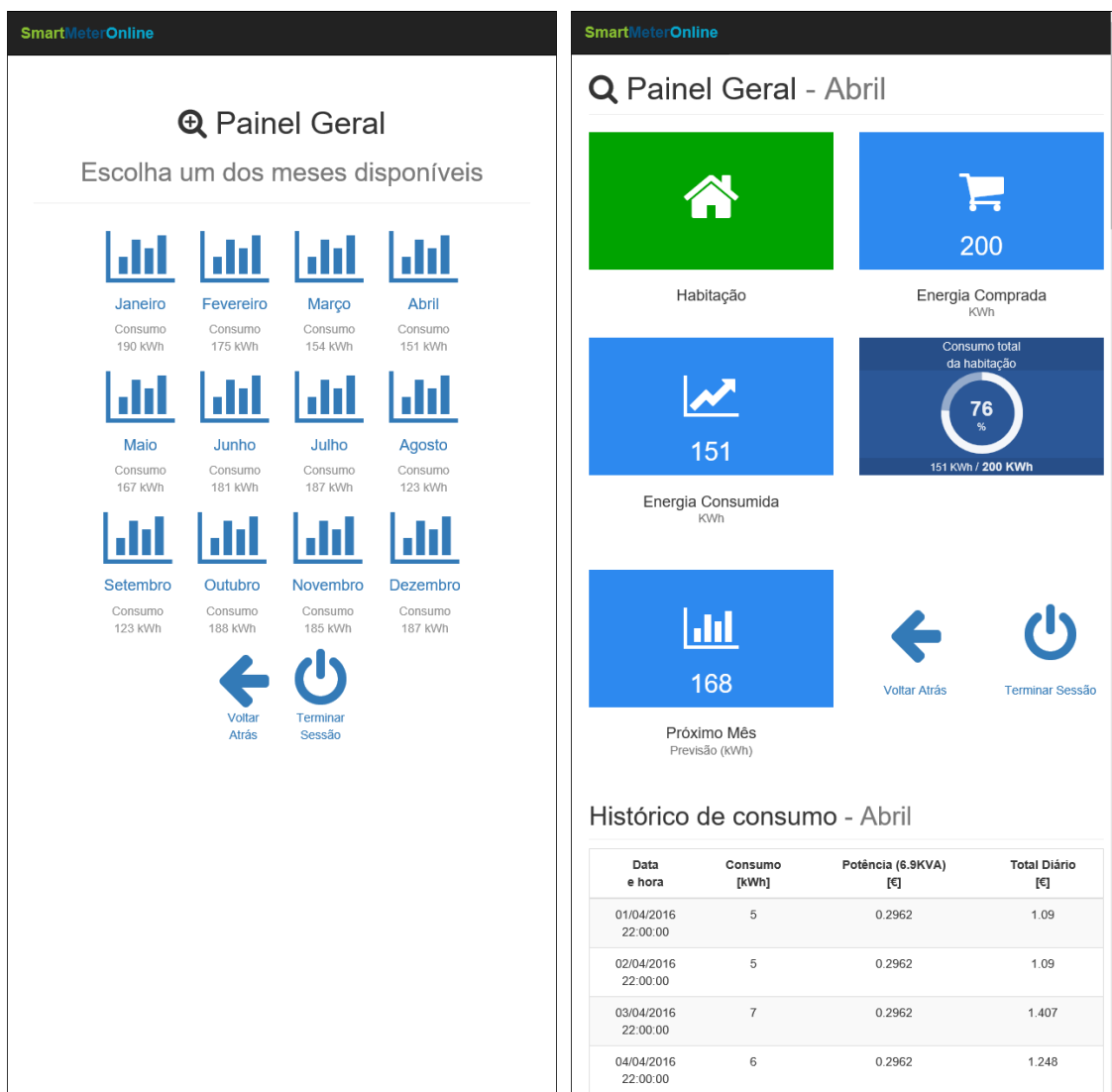


Figura 4.17: Interface gráfica - escolher mês, mês de abril.

Na figura 4.17(a), estão representados os meses em que o consumo foi monitorizado, bastando ao utilizador selecionar o mês pretendido, sendo redirecionado para uma nova página (ver figura 4.17(b)), em que é apresentada a energia comprada, a energia consumida, a percentagem de consumo *vs* energia comprada, a previsão de consumo para o próximo mês, um botão "voltar atrás", uma tabela que descreve diariamente o consumo em kWh, o custo de potência e o custo total por dia (consumo acrescido da potência) em euros (€).



## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados práticos resultantes da aplicação dos métodos de previsão de consumo explicados no capítulo anterior, metodologia Box & Jenkins, MMS e SES. Aborda ainda os resultados práticos de monitorização individual de vários equipamentos.

### 5.1 Análise aos Métodos de Previsão de Consumo

Apesar de se ter voltado a testar a metodologia Box & Jenkins com a nova quantidade de dados, ou seja, uma amostra diária, cerca de 336 amostras (de 1 outubro 2015 a 31 agosto 2016), para o Caso A e B, continuou a não ser possível verificar a estacionaridade da série. Como tal, não faria sentido apresentar resultados acerca do erro de previsão respeitante à metodologia Box & Jenkins. Talvez com uma maior quantidade de amostras, de vários anos, ou mesmo de várias amostras diárias, o resultado possa vir a melhorar.

Sendo assim, a avaliação dos resultados experimentais irá centrar-se nos dois métodos em que se obtiveram resultados interessantes, conforme se constatou em capítulo anterior, ou seja, o método de Média Móvel (MMS) e a Suavização Exponencial Simples (SES).

No que diz respeito à MMS, conforme se pode observar na tabela 5.1, verificou-se que no (Caso A), no mês de dezembro existe uma alteração de consumo, que advém, de um pico de dois dias seguidos, em que foi consumido o dobro da média diária do mês, tendo sido depois dissolvido pelo dia de Natal e Ano Novo. Devido às férias da Páscoa, em março, cerca de quatro dias contribuíram para a redução de consumo. O mesmo se verifica em relação a fevereiro.

Quanto ao (Caso B), como tem um consumo em que não existem variações tão bruscas, as previsões através da MMS, neste modelo, acabaram por não ser tão sacrificadas. Conclui-se, assim, que em caso de picos bastante elevados relativamente à média diária,

Tabela 5.1: Tabela de resultados de previsão usando o método de Suavização Exponencial Simples e Média Móvel Simples de outubro a agosto 2016

	<b>Caso A (3 habitantes)</b>			<b>Caso B (3 habitantes)</b>		
	MAPE [%] 7 dias		Consumo real [kWh]	MAPE [%] 7 dias		Consumo real [kWh]
	SES	MMS		SES	MMS	
<b>Outubro</b>	4.04	1.06	188	0.56	1.64	183
<b>Novembro</b>	5.86	8.65	185	2.63	1.66	181
<b>Dezembro</b>	1.41	0.53	187	0.07	6.40	203
<b>Janeiro</b>	5.68	6.84	190	0.77	6.37	204
<b>Fevereiro</b>	5.75	11.43	175	2.76	0.00	170
<b>Março</b>	6.12	14.94	154	1.08	3.51	171
<b>Abril</b>	2.72	0.66	151	4.16	3.47	173
<b>Maio</b>	2.91	0.6	167	0.82	4.22	166
<b>Junho</b>	3.84	2.76	181	0.29	7.41	162
<b>Julho</b>	3.01	1.06	187	5.93	11.35	185
<b>Agosto</b>	8.88	5.98	184	12.79	15.69	153

ou ausência de pessoas na habitação, pelas mais variadas razões, bastam apenas poucos dias para se registarem desvios na precisão deste modelo.

Ao usar a SES (ver tabela 5.1), verifica-se que, no Caso B, nos últimos dois dias de abril, o consumo reduziu significativamente, presumindo-se que, por ausência de gente na habitação. Uma vez que, com este método, são usados valores imediatamente anteriores, neste caso com um peso de  $\alpha = 0.22$ , este acaba por aumentar o erro, relativamente ao modelo MMS.

Tabela 5.2: Tabela de resultados de previsão aplicando a dois novos casos o método de Suavização Exponencial Simples e Média Móvel Simples de julho a agosto 2016

	<b>Caso C (2 habitantes)</b>			<b>Caso D (1 habitante)</b>		
	MAPE [%] 7 dias		Consumo real [kWh]	MAPE [%] 7 dias		Consumo real [kWh]
	SES	MMS		SES	MMS	
<b>Julho</b>	0.29	2.01	199	0.69	3.62	138
<b>Agosto</b>	0.49	9.27	205	19.86	16.67	144

Ao aplicar os mesmos métodos, Média Móvel Simples (MMS) e Suavização Exponencial Simples (SES) a dois novos casos apelidados de (Caso C) e (Caso D), pretendeu-se verificar se o método de previsão funcionaria igualmente em termos de erro percentual, até porque, nestes dois casos o número de habitantes é inferior, menos um para o (Caso C) e menos dois para o (Caso D). Ao analisar os resultados da tabela 5.2, verifica-se que, usando a SES, se obteve um erro razoável, em consonância com a ordem de grandeza presente na tabela 5.1.

Para melhor visualização da precisão dos modelos, tendo em conta o consumo mensal e a qualidade do modelo (100 % é considerado excelente), foram elaborados os gráficos das figuras 5.1 e 5.2, respeitantes ao Caso A e B, respetivamente.

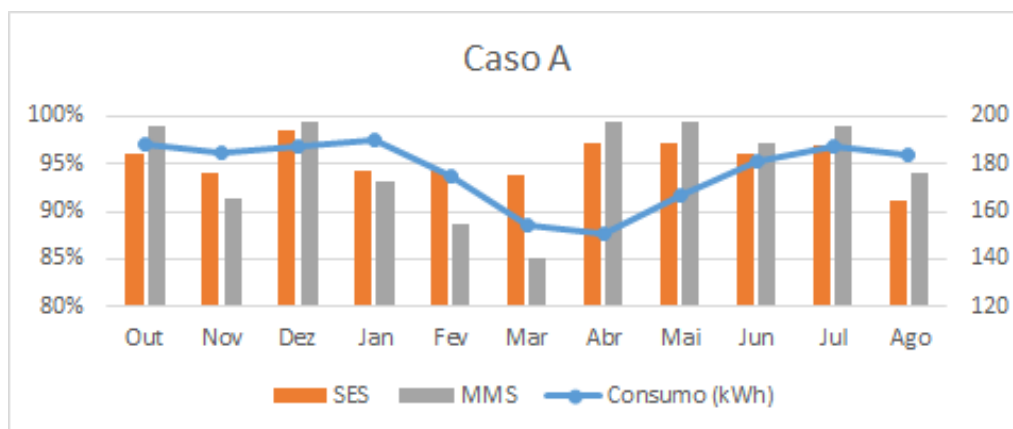


Figura 5.1: Gráficos de precisão de métodos analisados para o Caso A.

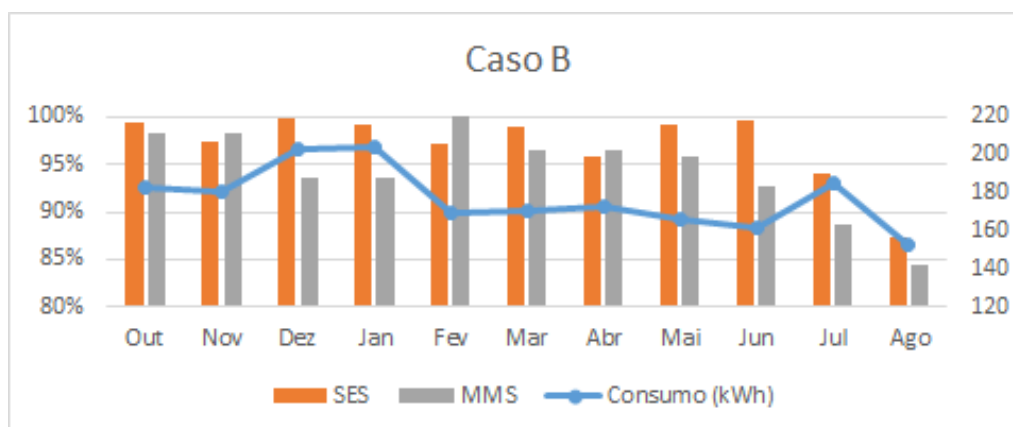


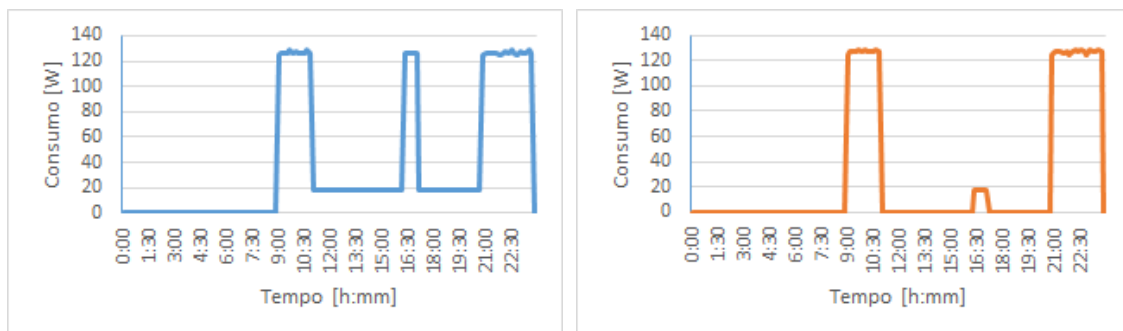
Figura 5.2: Gráficos de precisão de métodos analisados para o Caso B.

Conclui-se assim que, em termos gerais, apesar da MMS apresentar menores erros em termos percentuais, em alguns meses, quando existe uma variação brusca de consumos na habitação, neste caso entre 3 e 6 kWh, este método apresenta erros na ordem das dezenas.

Quando analisado o método SES, apesar de se terem obtido erros maiores (mas nunca tão elevados, 6 % contra 14 %) em relação à MMS, estes erros são mais lineares e com valores razoáveis, sendo assim dos métodos analisados o mais indicado para ser aplicado na previsão de consumo da habitação.

## 5.2 Monitorização de Consumo

Após calibrado o sensor de corrente, procedeu-se ao teste de leituras de consumo em intervalos de 10 minutos, de um conjunto televisão e *set-top-box*, ao longo de 24 horas.



(a) Consumo ao longo de um dia.

(b) Consumo ao longo de um dia, com corte de energia.

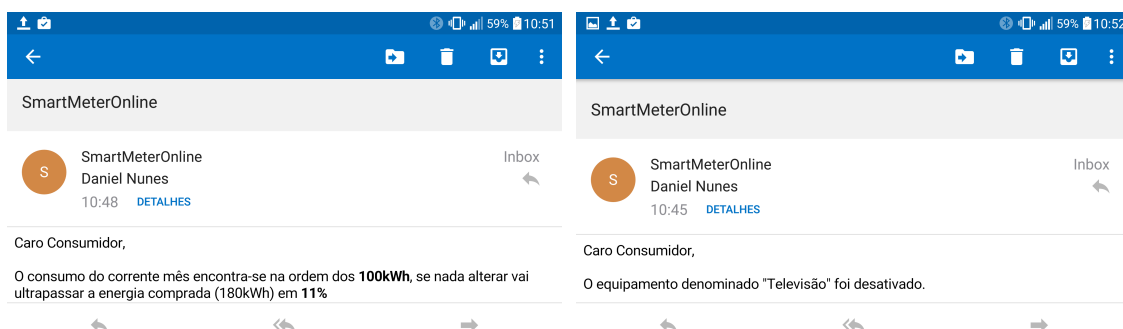
Figura 5.3: Consumo ao longo de um dia.

Como se pode observar na figura 5.3(a), o dia iniciou-se com os dois aparelhos desligados da corrente, devido à existência de uma extensão tripla com botão de corte de energia. Por volta das 9 horas, este botão foi acionado, tendo-se colocado em funcionamento a *set-top-box* e televisão. Cerca das 11 horas, estes equipamentos ficaram em *standby* até as 16 horas e 30 minutos.

Ao analisar este gráfico, verifica-se que existe um consumo instantâneo de aproximadamente 20 W, com estes equipamentos em *standby*.

Com vista a testar se o circuito de monitorização e corte de energia projetado em conjunto com o *software* se encontra a funcionar corretamente, foi testado o seguinte cenário:

O consumo cumulativo até meio do corrente mês foi definido para 100kWh e o limite/objetivo de consumo para o mesmo mês foi definido para 180kWh.



(a) Excesso de consumo previsto.

(b) Ocorrida uma desativação.

Figura 5.4: Exemplos de notificação por email.

Com base neste cenário, todos os equipamentos considerados não prioritários e que tenham sido monitorizados, devem ser desligados. Este corte de energia é feito com base no envio de email ao consumidor, informando que a 50% do corrente mês, o consumo vai além do objetivo traçado inicialmente. Informa também qual será o excesso de consumo previsto.

Para que o mecanismo de corte automático funcione, deve partir das seguintes premissas: o equipamento seja não prioritário e tenha registo histórico (monitorização ligada) nos 7 dias anteriores. Se estas duas condições se verificarem, o equipamento é automaticamente desligado, sendo que o consumidor é igualmente notificado por email. O resultado desta ação no consumo, pode ser observado na figura 5.3(b)



## CONCLUSÃO

Neste capítulo serão abordadas questões relativas ao cumprimento dos objetivos traçados inicialmente, bem como às conclusões, de forma sucinta, acerca dos vários temas abordados, como, por exemplo, a pré-compra de energia, a previsão de consumo e a monitorização de consumos da habitação, bem como os equipamentos existentes no seu interior.

### 6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado atingiu os objetivos propostos inicialmente, tendo ido mesmo um pouco além dos requisitos iniciais.

#### Objetivos:

- Estudar as opções adotadas por outros países que utilizam o sistema pré-pago de energia e sugerir, para Portugal, uma proposta, tendo em vista a sua eficiência, facilidade de uso, implantação e a diferenciação de tarifas. ✓
- Comparar o sistema pré-pago com os pós-pagos atualmente existentes. ✓
- Estudar qual o modelo mais aconselhado, tendo em vista a previsão de consumo de energia elétrica na habitação de cada consumidor. ✓
- Estudar e propor um modelo de monitorização de consumos, tendo como objetivo aconselhar o consumidor, de maneira a este atingir o seu objetivo pré-definido aquando da pré-compra de energia elétrica. ✓

- Estudar e desenvolver uma interface para o consumidor poder aceder à previsão de consumo da habitação, bem como a monitorização e gestão de tarifários relativamente à sua habitação. ✓
- **Extra:** desenvolvimento de uma plataforma *web* acessível por uma rede sem fios que disponibiliza diversas informações úteis para o consumidor, como prever consumos e monitorizar equipamentos dentro da habitação. ✓
- **Extra:** plataforma *web* desenvolvida que funcione em várias plataformas e acessível através de diferentes dispositivos. ✓
- **Extra:** monitorizar, individualmente equipamentos existentes, dentro da habitação, e avisar o consumidor caso haja alguma anomalia, como por exemplo, se o equipamento ficou ligado ou desligado, tendo em conta o histórico recente. ✓
- **Extra:** possibilidade de ligar/desligar cargas individualmente (dentro da habitação) e remotamente, através de uma rede sem fios. ✓
- **Extra:** Permite adicionar diversos módulos para fazer a monitorização, sendo um para cada equipamento, individualmente.
- Descrever os principais problemas da solução proposta. ✓

### 6.1.1 Pré-Compra de Energia

No que diz respeito à pré-compra de energia, sugere-se que seja algo semelhante ao atualmente implementado no sistema de pré-carregamento dos telefones móveis, que consiste numa entidade para pagamento e um identificador único, que poderá ser, por exemplo, o número do contador, acrescido de um conjunto de códigos alfanuméricos, para evitar erros na introdução de créditos de energia. Ao usar o sistema semelhante ao pré-carregamento de telefones móveis, usar-se-ia a rede de caixas multibanco, como ponto de acesso ao carregamento, funcionando como alternativa a uma plataforma *online*, onde se poderiam fazer os carregamentos e permitir também a escolha de fornecedor de energia (a realizar num prazo máximo de 30 dias). Assim, haveria uma centralização na oferta no mercado de energia elétrica, facilitando tanto fornecedores como consumidores.

Existiriam também créditos de emergência, que seriam utilizados como uma reserva de energia, ou seja, assim que os créditos do consumidor acabam, os créditos de emergência são ativados, para que o consumidor não seja afetado pelo corte de fornecimento de energia imediatamente, sendo que este crédito de emergência deve ser repostado assim que o consumidor compre novamente créditos.

Além do crédito de emergência, é importante a utilização de um sistema que não interrompa o fornecimento de energia durante a noite, pois, neste período, os serviços de apoio estarão fechados e, ainda, porque a hipótese de ocorrer um acidente se torna muito maior, podendo até acarretar consequências graves. A título de exemplo, caso o



consumidor tenha um dispositivo médico de fornecimento de oxigénio que necessite de energia, decerto que, do corte de energia, adviriam consequências para o distribuidor, como processos judiciais.

Relativamente ao tipo de medidor mais adequado para usar em Portugal, seria o contador inteligente semelhante ao utilizado no projeto, por ser simples de implementar nas infraestruturas já existentes, tendo em conta que usa a própria linha de alimentação como veículo de comunicação, ter funcionalidades remotas como leituras, alteração de regimes horários (simples, bi-horário, tri-horário), corte de energia remotamente, deteção de ilegalidades no que diz respeito à potência contratada, entre outros.

Como o distribuidor/fornecedor pode aceder remotamente, sugere-se que seja implementada uma plataforma *online* gratuita que forneça informações úteis do ponto de vista do consumo, que consciencialize e ajude o consumidor, de algum modo, a reduzir o seu consumo, estando apenas disponível a quem aderir ao sistema pré-pago de energia.

Como proposta para a redução de consumo, seria que os valores de desconto fossem variáveis, ou seja, quanto menor o consumo maior o desconto, sendo que a partir de determinado valor a estudar, não teria acesso a qualquer desconto. Quanto ao regime geral, o desconto de menor consumo manter-se-ia e acumularia com possíveis descontos de compra em avanço de mais do que um mês.

### **6.1.2 Previsão de Consumo de Energia**

Inicialmente, com base nos dados adquiridos e disponíveis, dos últimos 3 meses do ano de 2015, procedeu-se ao estudo tendo em vista a elaboração de um modelo de previsão, o qual posteriormente se voltou a testar com os meses seguintes (até agosto de 2016)

A primeira tentativa abordada foi a metodologia Box & Jenkins, que se mostrou vir a ser infrutífera, pois falhou na condição de estacionaridade. Talvez com uma maior quantidade de dados disponíveis o resultado fosse outro. Contudo, através desta metodologia, conseguiu obter-se um dado importante, a existência de sazonalidade semanal dos consumos.

A partir da sazonalidade, abordou-se uma outra técnica, Média Móvel Simples (MMS), que para 4 casos analisados se provou ter resultados bastante razoáveis. Contudo, detetou-se o problema de, quando existe um pico elevado, tanto por defeito como por excesso, nos sete dias que servem de base para a previsão mensal. A precisão do modelo é sacrificada, indo mesmo para valores de erros perto de uma dezena.

Com vista a minimizar estas alterações, optou-se por utilizar a Suavização Exponencial Simples (SES), que tem a vantagem de necessitar somente das últimas amostras, pois, quando é calculado um novo valor, é atribuído um peso à anterior, sendo assim uma opção adequada para anular ruído nas amostras. Contudo, existe sempre o revés da medalha. Apesar de já não existirem erros com valores que rondam uma dezena, em termos gerais, quando o erro da MMS era baixo, a SES aumentou muito ligeiramente, mas, quando na

MMS se obtiveram erros elevados, a SES acabou por reduzi-los drasticamente, em alguns dos casos, para metade.

Poderá dizer-se que os erros advêm do facto de ser impossível prever a quantidade de pessoas, ou a ausência dela(s), num determinado espaço temporal, o que influencia diretamente os valores de consumo energético.

### 6.2 Trabalhos Futuros

Tanto o trabalho como a plataforma desenvolvida estão longe de estar terminados, pois existe ainda espaço para melhoramentos. As funcionalidades que podem ainda ser adicionadas e/ou melhoradas serão, por exemplo:

- Método facilitador de ligação e configuração dos nós às redes *Wi-Fi*.
- Capacidade de programar remotamente os nós.
- Melhoramento do modelo de previsão, utilizando por exemplo, usando outras variáveis, como o número de elementos em cada habitação.
- Realizar um teste piloto, monitorizando individualmente os principais equipamentos de cada habitação, para obter dados mais fiáveis, de maneira a melhorar o modelo de previsão.
- Proceder à realização de um estudo para verificar se com o cenário de pré-pagamento, aliando a monitorização individual de equipamentos, se altera o comportamento de consumo.
- Produzir uma placa de raiz com o Arduino (esquemático do circuito é gratuito) e o circuito de monitorização integrado, capaz de se ligar diretamente a uma tomada.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Schaefersman. “An Introduction to Science: Scientific Thinking and the Scientific Method”. 1994. URL: <http://www.indiana.edu/~educy520/readings/schaefersman94.pdf>.
- [2] S. Statistics. *OECD Factbook 2014*. 2011. 2014, p. 258. ISBN: 9789264204157. DOI: 10.1787/data-00589-en.
- [3] Ren - Rede Eléctrica Nacional. “Caracterização da rede nacional de transporte para efeitos de acesso à rede em 31 de Dezembro de 2014”. Em: (2014), p. 72. URL: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/CaracterizacaoRNT/CaracterizacaoRNT31-12-2014.pdf>.
- [4] IEA. “Energy Balances of OECD Countries (2015 edition)”. Em: *International Energy Agency*. Vol. 90. 2. 2015, p. 8. DOI: 10.1787/19962835-en.
- [5] P. INE, DGEG/MAOTE. *Consumo de energia eléctrica per capita*. 2014. URL: <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+electrica+per+capita+total+e+por+tipo+de+consumo-1230> (acedido em 01/01/2016).
- [6] P. DGEG/MAOTE. *Produção bruta de energia eléctrica: total e por tipo de produção de energia eléctrica - Portugal*. 2014. URL: <http://www.pordata.pt/Portugal/Producao+bruta+de+energia+electrica+total+e+por+tipo+de+producao+de+energia+electrica-1126> (acedido em 02/02/2016).
- [7] ANNEL. *ANNEl - Agência Nacional de Energia Elétrica*. 2011. URL: <http://www.aneel.gov.br/> (acedido em 01/02/2016).
- [8] GovernoFederaldoBrasil. *Modelo pré-pago para compra de energia eléctrica*. 2011. URL: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/04/aneel-aprova-modelo-pre-pago-para-compra-de-energia-eletrica>.
- [9] ERSE; KEMA. *Estudo sobre contadores inteligentes de electricidade e de gás natural*. Rel. téc. Lisboa: ERSE, 2012, p. 71.
- [10] EDP-Distribuição. *InovGrid*. 2011. URL: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx> (acedido em 14/02/2016).
- [11] P. Europeu. *Eficiência energética*. 2002. URL: [http://www.adene.pt/sites/default/files/1\\\_\\\_00120030104pt00650071.pdf](http://www.adene.pt/sites/default/files/1\_\_00120030104pt00650071.pdf) (acedido em 01/01/2016).

- [12] B. W. Olesen, O. Seppanen e A. Boerstra. "Criteria for the indoor environment for energy performance of buildings: A new European standard". Em: *Facilities* 24 (2006), pp. 445–457. ISSN: 0263-2772. DOI: 10.1108/02632770610684927.
- [13] B. Birt e G. R. Newsham. "Post-occupancy evaluation of energy and indoor environment quality in green buildings : a review". Em: *3rd International Conference on Smart and Sustainable Built Environments* (2009), pp. 1–7.
- [14] T. Godish. *Indoor Environmental Quality*. Ed. por CRC Press LLC. LEWIS PUBLISHERS, 2001, pp. 196–197. ISBN: 1-56670-402-2.
- [15] O. A. Seppanen e W. Fisk. "Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health". Em: *HVAC and R Research* 12.4 (2006), pp. 957–973. ISSN: 10789669.
- [16] O. Seppänen, W. J. Fisk e Q. H. Lei. "Ventilation and performance in office work". Em: *Indoor Air* 16.1 (2006), pp. 28–36. ISSN: 09056947. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2005.00394.x.
- [17] S. Ramos e Z. Vale. "Data mining techniques application in power distribution utilities". Em: *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* (2008), pp. 1–8. DOI: 10.1109/TDC.2008.4517229.
- [18] P. P. P. Peilin e D. G. D. Guangbin. "Power quality detection and discrimination in distributed power system based on wavelet transform". Em: *27th Chinese Control Conference*. 2008, pp. 635–638. ISBN: 978-7-900719-70-6. DOI: 10.1109/CHICC.2008.4605103.
- [19] C. H. Lin e C. H. Wang. "Adaptive wavelet networks for power-quality detection and discrimination in a power system". Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 21.3 (2006), pp. 1106–1113. ISSN: 08858977. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.874105.
- [20] C. N. Bhende, S. Mishra e B. K. Panigrahi. "Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network". Em: *Electric Power Systems Research* 78.1 (2008), pp. 122–128. ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.12.011.
- [21] K. Silva, B. Souza e N. Brito. "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN". Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 21.4 (2006), pp. 2058–2063. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.876659.
- [22] F. B. Costa, K. M. Silva, B. A. Souza, S. Member, K. M. C. Dantas e N. S. D. Brito. "A Method for Fault Classification in Transmission Lines Based on ANN and Wavelet Coefficients Energy". Em: *Neural Networks* (2006), pp. 3700–3705. DOI: 10.1109/IJCNN.2006.247385.

- [23] H. M. Dola e B. H. Chowdhury. "Data mining for distribution system fault classification". Em: *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005*. Vol. 2005. 2005, pp. 457–462. ISBN: 0780392558. DOI: 10.1109/NAPS.2005.1560559.
- [24] W.-Y. Loh. "Classification and regression trees". Em: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 1.1 (2011), pp. 14–23. ISSN: 19424787. DOI: 10.1002/widm.8. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/widm.8>.
- [25] W. Mendenhall e T. Sincich. *A Second Course in Statistics: Regression Analysis*. Ed. por Prentice Hall. 7th. Pearson, 2011, p. 816. ISBN: 9780321691699.
- [26] G. Zhang. "Neural networks for classification: a survey". Em: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 30.4 (2000), pp. 451–462. ISSN: 10946977. DOI: 10.1109/5326.897072.
- [27] C. Cortes e V. Vapnik. "Support-Vector Networks". Em: *Machine Learning* 20.3 (1995), pp. 273–297. ISSN: 15730565. DOI: 10.1023/A:1022627411411. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [28] V Figueiredo, F Rodrigues, Z Vale e J. B. Gouveia. "An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques". Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 20.2 (2005), pp. 596–602. ISSN: 08858950 (ISSN). DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846234.
- [29] P. Berkhin. "Survey of Clustering Data Mining Techniques". Em: *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* (2006), pp. 25–71. ISSN: 1557900X. DOI: 10.1007/3-540-28349-8\_2.
- [30] Y. Zhang. "Applications of Data Mining Theory in Electrical Engineering". Em: *Engineering* 01.03 (2009), pp. 211–215. ISSN: 1947-3931. DOI: 10.4236/eng.2009.13025.
- [31] M. Ranjan e V. K. Jain. "Modelling of electrical energy consumption in Delhi". Em: *Energy* 24.4 (1999), pp. 351–361. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/S0360-5442(98)00087-5.
- [32] R. G. D. STEEL e J. H. TORRIE. "Principles and procedures of statistics." Em: 4.3 (1960), pp. 207–208. DOI: 10.1002/bimj.19620040313.
- [33] S Kalogirou. "Artificial neural networks for the prediction of the energy consumption of a passive solar building". Em: *Energy* 25.5 (2000), pp. 479–491. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00086-9.
- [34] G. K. F. Tso e K. K. W. Yau. "Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks". Em: *Energy* 32.9 (2007), pp. 1761–1768. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2006.11.010.

- [35] L. A. Breslow e D. W. Aha. "Simplifying decision trees : a survey". Em: *The Knowledge Engineering Review* 20375.202 (1997), pp. 1–47. ISSN: 02698889. DOI: 10.1017/S0269888997000015.
- [36] W. Headquarters e S. I. Inc. *SAS Enterprise Miner*. URL: [http://www.sas.com/en{\\\_}us/software/analytics/enterprise-miner.html](http://www.sas.com/en{\_}us/software/analytics/enterprise-miner.html) (acedido em 01/01/2015).
- [37] C Chen, B Das e D. J. Cook. "Energy Prediction Based on Resident ' s Activity". Em: *Proceedings of the 4th International workshop on Knowledge Discovery from Sensor Data (SensorKDD '10)* 1-7 (2010), pp. 1–7.
- [38] R. J. Orr e G. D. Abowd. "The Smart Floor : A Mechanism for Natural User Identification and Tracking". Em: *Conference on Human Factors in Computing Systems*, (2000), pp. 275–276. DOI: 10.1145/633292.633453.
- [39] M. C. Mozer. "The neural network house: An environment that adapts to its inhabitants". Em: *American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments* December (1998), pp. 110–114. DOI: SS-98-02/SS98-02-017.
- [40] BeAware. *BeAware is a collaborative research project co-funded by the European Union*. URL: <http://www.energyawareness.eu/beaware/> (acedido em 03/02/2016).
- [41] I Rish. "An empirical study of the naive Bayes classifier". Em: *IJCAI 2001 Workshop on Empirical Methods in Artificial Intelligence* 3.22 (2001), pp. 41–46. ISSN: 14639076. DOI: 10.1039/b104835j.
- [42] J Pearl. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. 1988, p. 552. ISBN: 1558604790. DOI: 10.1016/0020-7101(91)90056-K. arXiv: 1558604790.
- [43] F. Pellegrini e F. Fogliatto. "Passos para implantação de sistemas de previsão de demanda: técnicas e estudo de caso". Em: *Produção* 11.1 (2001), pp. 43–64. ISSN: 0103-6513. DOI: 10.1590/S0103-65132001000100004.
- [44] A. Moreno-Munoz, J. J. G. De La Rosa, R. Posadillo e V. Pallares. "Short term forecasting of solar radiation". Em: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2008, pp. 1537–1541. ISBN: 1424416655. DOI: 10.1109/ISIE.2008.4676880.
- [45] G. E. P. Box, G. M. Jenkins e G. C. Reinsel. *Time series analysis*. Wiley, 2008, p. 756. ISBN: 978-0-470-27284-8. DOI: 10.1007/SpringerReference\_6246.
- [46] S. G. Makridakis, S. C. Wheelwright e R. J. Hyndman. *Forecasting: Methods and Applications*. Wiley, 1997, p. 656. ISBN: 978-0471532330.
- [47] N. Davis, Mark Chase, Richard Aquilano. *Fundamentos da Administração da Produção*. 3 edição. Bookman, 2001, p. 600. ISBN: 9788573075243.
- [48] D. Rumsey. *Statistics II*. 1 edition. 2009, p. 408. ISBN: 978-0470466469.

- [49] ERSE. *Descontos Sociais de eletricidade*. URL: <https://www.edpsu.pt/pt/destaques/Pages/TarifaSocialAsece.aspx> (acedido em 29/07/2016).
- [50] GALP. *TABELA DE PREÇOS GALP*. 2016. URL: [https://www.galpon.pt/docs/prices/tabela{\\\_}precos{\\\_}galp.pdf](https://www.galpon.pt/docs/prices/tabela{\_}precos{\_}galp.pdf) (acedido em 29/07/2016).
- [51] L. Werner e J. L. D. Ribeiro. “Previsão de Demanda: Uma Aplicação dos Modelos Box- Jenkins na Área de Assistência Técnica de Computadores Pessoais”. Em: *Gestão e Produção* 10.1 (2013), pp. 47–67. ISSN: 1098-6596. DOI: 10.1017/CB09781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [52] R. E. Abdel-Aal e A. Z. Al-Garni. “Forecasting monthly electric energy consumption in eastern Saudi Arabia using univariate time-series analysis”. Em: *Energy* 22.11 (1997), pp. 1059–169. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/S0360-5442(97)00032-7.
- [53] C. Morettin, Pedro; Toloi. “Previsão de Séries Temporais”. Em: *São Paulo* (1987). DOI: 10.1590/S1415-790X2001000300002.
- [54] M. A. S. Vasconcellos. *Manual de econometria*. 1a. Atlas Editora, 2000, pp. 199–204. ISBN: 8522421544.
- [55] C. Nelson. *Applied time series analysis for managerial forecasting*. San Francisco: Holden Day, 1973, p. 231. ISBN: 978-0816263660.
- [56] C. W. J. Granger e P. Newbold. *Forecasting Economic Time Series*. Vol. 20. 4. 1998, pp. 15721–15724. ISBN: 0521632420. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2003.10.002.
- [57] M. Machado. “Modelos de previsão aplicados à optimização da gestão das actividades de um Call Center”. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa, 2012. DOI: <http://hdl.handle.net/10451/9422>.
- [58] R. G. D. Miranda e R. W. Samohyl. “Espaço admissível para os parâmetros do modelo de suavização exponencial com dupla sazonalidade aditivo”. Tese de doutoramento. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009, pp. 1–75. URL: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92565>.
- [59] IEEE. *IEEE - Standards 802*. 2016. URL: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.html> (acedido em 07/02/2016).
- [60] Z. Alliance. *Protocolo ZigBee*. 2016. URL: <http://www.zigbee.org/> (acedido em 07/02/2016).
- [61] ICPDAS. *Topologias de rede - ZigBee*. 2016. URL: [http://www.icpdas.com/root/product/solutions/industrial{\\\_}wireless{\\\_}communication/wireless{\\\_}solutions/zigbee{\\\_}introduction.html](http://www.icpdas.com/root/product/solutions/industrial{\_}wireless{\_}communication/wireless{\_}solutions/zigbee{\_}introduction.html) (acedido em 07/02/2016).
- [62] SIG. *Bluetooth*. 2016. URL: <https://www.bluetooth.com/> (acedido em 07/02/2016).
- [63] M. Atmel. *ATmega328P Datasheet*. URL: <http://www.atmel.com/devices/atmega328p.aspx> (acedido em 06/02/2016).

- [64] M. Atmel. *ATmega2560 Datasheet*. URL: <http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx> (acedido em 06/02/2016).
- [65] M. Atmel. *ATmega32U4 Datasheet*. URL: <http://www.atmel.com/devices/atmega32u4.aspx> (acedido em 06/02/2016).
- [66] Intel. *Intel Curie Datasheet*. URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/wearables/intel-curie-fact-sheet.html> (acedido em 06/02/2016).
- [67] Arduino. *Diferença entre placas Arduino*. 2016. URL: <https://www.arduino.cc/en/Products/Compare> (acedido em 06/02/2016).
- [68] Espressif. *ESP8266 Datasheet*. 2016. URL: [https://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex{\\\_}datasheet{\\\_}en.pdf](https://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex{\_}datasheet{\_}en.pdf) (acedido em 01/02/2016).
- [69] ESP8266. *Biblioteca chip wifi esp8266 para Arduino*. URL: <https://github.com/esp8266/Arduino> (acedido em 11/02/2015).
- [70] YHDC. *YHDC - SCT-013-30 Datasheet*. URL: <https://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ct-sensors-interface> (acedido em 01/02/2016).
- [71] P. D. B. d. S. Gomes. “Sistema de Monitorização de Energia Eléctrica”. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 2012, p. 115. DOI: [hdl.handle.net/10362/8848](http://hdl.handle.net/10362/8848).
- [72] N. Ramos. “Smart-meter in Power Quality”. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2015, p. 78.
- [73] P. Jonsson e L. Eklundh. “Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data”. Em: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40.8 (2002), pp. 1824–1832. ISSN: 01962892. DOI: 10.1109/TGRS.2002.802519. arXiv: TGRS.2002.802519 [10.1109].
- [74] J.-Y. Peng e J. a. D. Aston. “The state space models toolbox for MATLAB”. Em: *Journal of Statistical Software* 41.6 (2011), pp. 1–26. ISSN: 1548-7660. DOI: <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v041.i06>.
- [75] N. IHS. *EViews 9.5 Student Version Lite*. 2016. URL: <http://www.eviews.com/EViews9/EViews9SV/evstud9.html>.
- [76] Fritzing.org. *Imagem Arduino Mega2560*. URL: [http://obrazki.elektroda.pl/6035825200{\\\_}1451334791.png](http://obrazki.elektroda.pl/6035825200{\_}1451334791.png) (acedido em 06/02/2016).
- [77] Arduino. *Arduino - AnalogRead*. URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead> (acedido em 06/02/2016).
- [78] Netcraft. *Web server developers: Market share of active sites*. URL: <http://news.netcraft.com/archives/2016/02/22/february-2016-web-server-survey.html> (acedido em 03/02/2016).



- [79] Solid IT. *DataBase Engines Ranking*. URL: <http://db-engines.com/en/ranking> (acedido em 03/02/2016).

